

1 EINLEITUNG

Innovative Werkstoffe spielen eine zentrale Rolle im modernen Fahrzeugbau und leisten einen wichtigen Beitrag für den automobilen Leichtbau. Leichte Strukturbauteile sind die Grundlage zur Reduktion der über Jahrzehnte stetig gestiegenen Fahrzeuggewichte und zur Erzielung bestmöglicher Fahrleistungen bei reduziertem Verbrauch. Der Einsatz von Verbundwerkstoffen ist ein vieldiskutierter Ansatz zum Leichtbau. Neben den klassischen polymeren und metallischen Verbundwerkstoffen bieten auch faserverstärkte Keramiken aufgrund ihrer geringen Dichte ein hohes Leichtbaupotenzial. In Kombination mit ihrer hohen Härte, Temperatur- und Thermoschockbeständigkeit ist diese Werkstoffklasse prädestiniert für den Einsatz als leistungsfähiger Brems scheibenwerkstoff.

Keramische Verbundbrems scheiben aus Kohlenstoff faser verstärktem Siliziumkarbid (C/SiC) sind, seit ihrer Markteinführung im Jahr 2001, aufgrund ihres deutlich geringeren Gewichts gegenüber metallischen Gussbrems scheiben und ihrer hohen Leistungsfähigkeit vor allem im prestigeträchtigen Sportwagen segment Stand der Technik und finden zunehmend Anwendung in hochmotorisierten und komfortbetonten Oberklasselimosinen und Sport Utility Vehicles (SUV). Einer weiteren Verbreitung stehen jedoch die hohen Kosten sowie das Fehlen einer großserientauglichen Herstellungstechnik entgegen. Für beide Aspekte sollen in dieser Arbeit Lösungen erarbeitet werden.

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Im Fahrzeugbau werden heute überwiegend Brems scheiben aus Grauguss eingesetzt. Diese sind, wegen der sehr hohen Fertigungsstückzahlen von mehreren Millionen Stück pro Jahr, der einfachen Herstellungstechnik, geringer Rohmaterialpreise und eines geringen Qualitätssicherungsaufwands, kostengünstig herstellbar. Die hohen Kosten keramischer Verbundbrems scheiben resultieren aus den verwendeten und in einer Vielzahl von Prozessschritten konditionierten Kohlenstofffasern, dem aufwändigen Formgebungs- und Herstellungsprozess, den geringen Stückzahlen und eines derzeit noch sehr hohen manuellen Aufwands in der Fertigung. Ein weiterer Kostentreiber ist der notwendige Qualitätssicherungsaufwand der vielzähligen Prozessschritte zur Gewährleistung einer hohen Bauteilqualität.

Der Schlüssel für eine weitere Marktdurchdringung von keramischen Verbundbrems scheiben ins kostensensitivere aber stückzahlattraktivere Mittelklasse segment liegt jedoch nicht nur in einer deutlichen Senkung der Herstellungskosten. Konstruktionsrichtlinien, Methoden zur Auslegung und Berechnung sowie neue Konzepte zur effizienten Bauteilprüfung müssen erarbeitet und standardisiert werden. Dabei bildet die Kenntnis der Wechselwirkungen zwischen Werkstoff, Herstellungsverfahren und Brems scheibenkonstruktion die Grundlage zur Entwicklung kostenreduzierter und stückzahlfähiger Brems scheibenkonzepte.

Während die bisherigen wissenschaftlichen Arbeiten sich vor allem auf Grundlagenentwicklungen zu Werkstoffen und Herstellungsverfahren konzentrierten, soll in dieser Arbeit,



ausgehend von der in Abbildung 1-1 dargestellten Referenzvariante, ein hierzu alternatives Werkstoff- und Bauweisenkonzept für eine stückzahlfähige Serienherstellung keramischer Verbundbremscheiben für den Einsatz in leistungsfähigen Straßenfahrzeugen entwickelt werden. Neben den technischen Anforderungen ist auch die Wirtschaftlichkeit zu berücksichtigen. Sie ist die Grundlage um als Serienbestückung neue stückzahlattraktivere Fahrzeugsegmente zu erschließen.

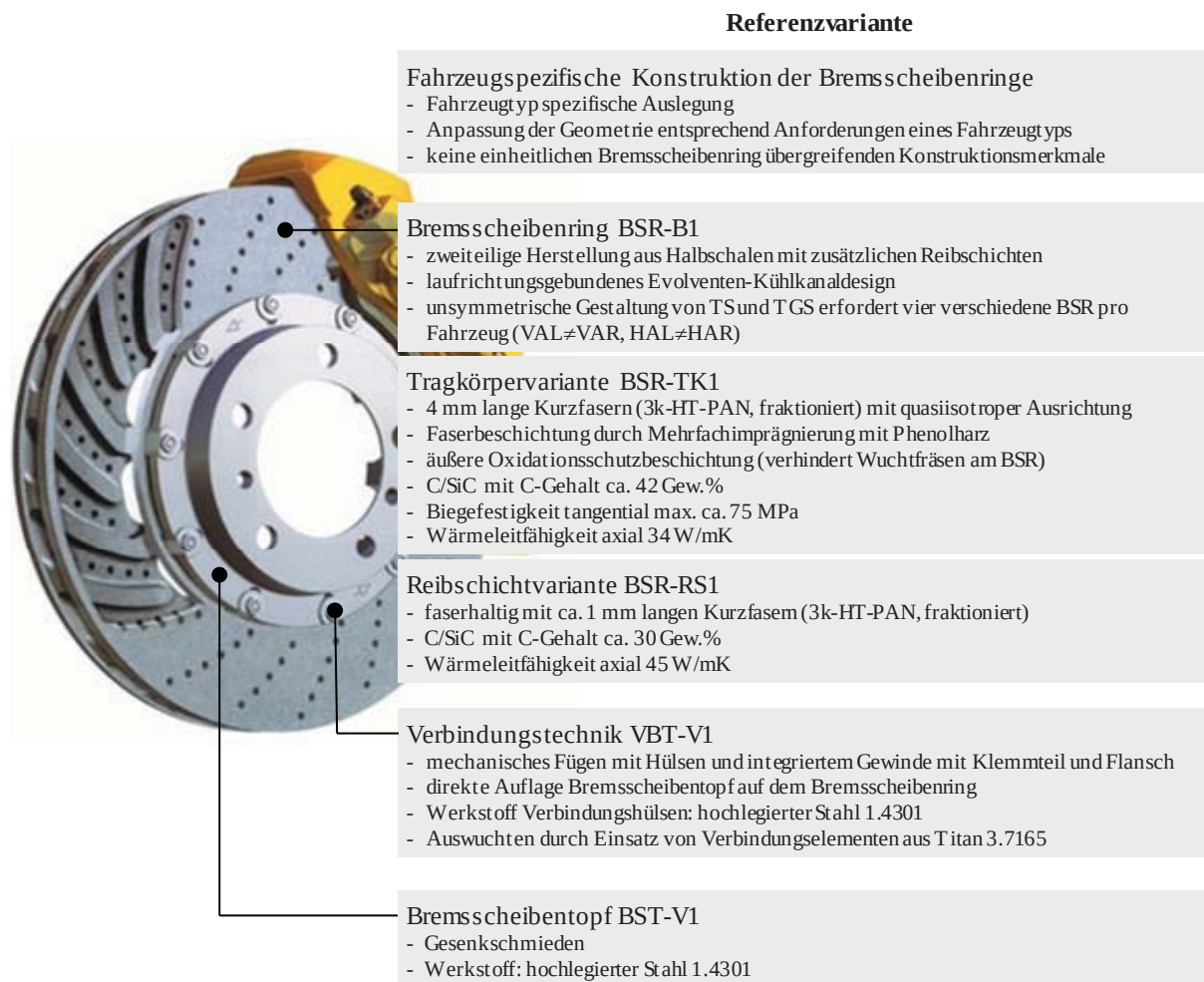


Abbildung 1-1: Referenzvariante in mehrteiliger Bauweise, bestehend aus dem Bremsscheibenring, dem Bremsscheibentopf und einzelnen Verbindungselementen.

Die Referenzvariante ist in einer mehrteiligen Bauweise, bestehend aus dem innenbelüfteten Bremsscheibenring (BSR, Variante B1), dem Bremsscheibentopf aus hochlegiertem Stahl (BST, Variante V1) und der notwendigen Verbindungstechnik (VBT, Variante V1), ausgeführt.

Charakteristisch für die Referenzvariante ist, dass die Auslegung, Konstruktion und Geometrie der Einzelteile fahrzeugspezifisch erfolgt. Dadurch ist die Referenzvariante zwar optimal an das jeweilige Fahrzeug angepasst, jedoch erfordert dies einen hohen Aufwand bei der Entwicklung und Herstellung von Bremscheiben über mehrere Fahrzeugderivate und



-klassen hinweg. Im Rahmen der Arbeit soll daher ein alternatives Konzept zur Variantenreduktion mit fahrzeugübergreifenden Konstruktionsmerkmalen erarbeitet werden.

Für eine wirtschaftliche Serienherstellung ist auch eine an hohe Stückzahlen angepasste Herstellungstechnologie für den BSR zu entwickeln. Hauptproblematik bei der Herstellung der Referenzvariante ist die Vielzahl an einzelnen Prozessschritten sowie die Verwendung kostenintensiver Rohstoffe. Da sich bisher nur das Flüssigsilizierungsverfahren zur Herstellung innenbelüfteter keramischer Brems scheibenringe für Straßenfahrzeuge etabliert hat, sollen sich die Betrachtungen ausschließlich auf dieses Verfahren fokussieren.

Die für den BSR verwendeten Werkstoffe der Referenzvariante für den Tragkörper (TK, Variante TK1) und die beidseitig aufgetragenen Reibschichten (RS, Variante RS1) sollen dahingehend weiterentwickelt, optimiert und qualifiziert werden, so dass deren Einsatz auch für alle Fahrzeugklassen, vom Sportwagen bis hin zum SUV mit hohen Anforderungen an die Reibwerthöhe und –stabilität (nachfolgend auch Reibwertcharakteristik genannt), die mechanische Festigkeit und Verschleißbeständigkeit, möglich wird.

Ableitbar aus der Vorgabe zum Einsatz im sportlichen Fahrzeugsegment sind weitere Anforderungen an den Leichtbau, den Bremskomfort und die optische Wertigkeit bei der Entwicklung von Alternativen zu berücksichtigen.

1.2 Lösungsweg

Die Vorgehensweise zur Entwicklung eines alternativen Werkstoff- und Bauweisenkonzepts für keramische Verbundbrems scheiben ist in Abbildung 1-2 dargestellt.

Zu Beginn wird eine Analyse des Stands der Technik durchgeführt (Kapitel 2). Neben der Betrachtung relevanter Brems scheibenwerkstoffe, ihrer Eigenschaften und Herstellungsverfahren, werden bekannte Bauweisen und deren Konstruktionsprinzipien beschrieben.

Anschließend werden die Einzelschritte zur Herstellung der Referenzvariante dargestellt, Alternativen hierzu aufgezeigt, vergleichend bewertet und eine Vorauswahl von Herstellungsvarianten getroffen (Kapitel 3).

Mit Hilfe einer Analyse des Bremssystems werden nachfolgend grundlegende Anforderungen an alternative Brems scheibenkonzepte identifiziert und Kriterien zur Auslegung, Berechnung und Bewertung der Varianten aufgezeigt (Kapitel 4).

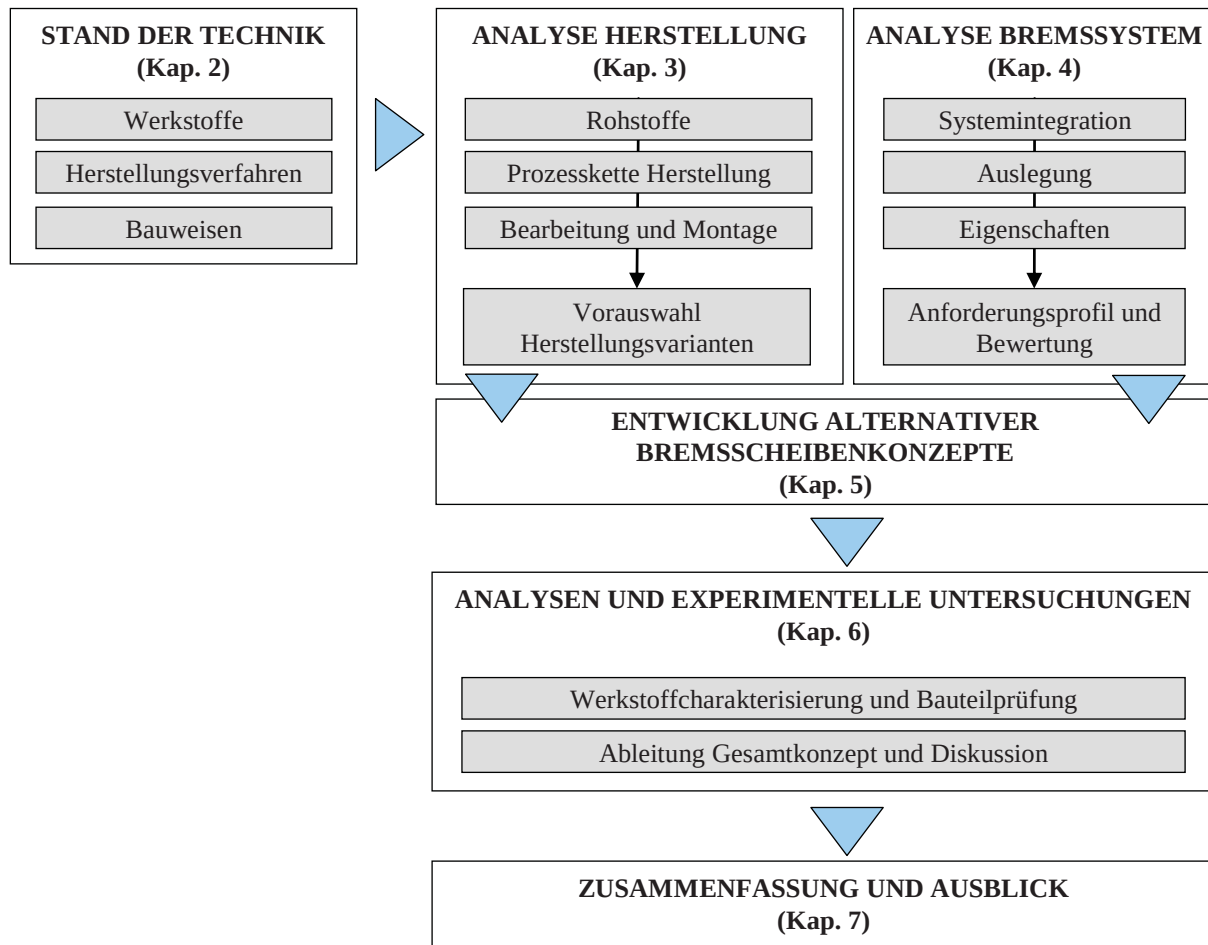


Abbildung 1-2: Vorgehensweise zur Entwicklung eines alternativen Werkstoff- und Bauweisenkonzepts für keramische Verbundbremsscheiben.

Basierend auf diesen Betrachtungen werden neue Werkstoff- und Bremsscheibenvarianten entwickelt und Dimensionierungseinflüsse (Abbildung 1-3), d. h. der Einfluss wichtiger geometrischer Abmessungen wie z. B. des Außendurchmessers, der Bremsscheibendicke und Kühlkanalhöhe, diskutiert (Kapitel 5). Für die eindeutige Bezeichnung richtungsabhängiger Konstruktionsmerkmale, Belastungszustände und Werkstoffeigenschaften, wird ein Koordinatensystem mit den Richtungsbezeichnungen axial (a), radial (r) und tangential (φ) festgelegt.

Als Ausgangspunkt für ein Gesamtkonzept werden zunächst verschiedene Grobkonzepte entworfen, die im weiteren Verlauf der Arbeit zunehmend konkretisiert, untersucht und detailliert werden. Durch die Zerlegung des Gesamtsystems Bremsscheibe in die drei Teilsysteme BSR, BST und VBT wird eine bessere Übersicht und die Möglichkeit geschaffen, durch Kombination von Einzellösungen eine neue Gesamtlösung zu entwickeln.

Im Weiteren werden die alternativen Werkstoff- und Bauweisenkonzepte vergleichend bewertet und charakterisiert (Kapitel 6). Zur Bewertung wird ein Vergleich mit der Referenzvariante durchgeführt. Für die experimentellen Analysen werden neben werkstoffspezifischen Untersuchungen auch Bauteiltests zur Ermittlung der Reibwertcharakteristik, des Verschleiß- und Korrosionsverhaltens und der Bauteilfestigkeit durchgeführt. Die Untersuchung der Bau-

teilstufigkeit erfolgt im Wesentlichen durch Finite-Elemente-Analysen (FEA) und Bauteiltests auf dem Schleuder- und Schwungmassenprüfstand.

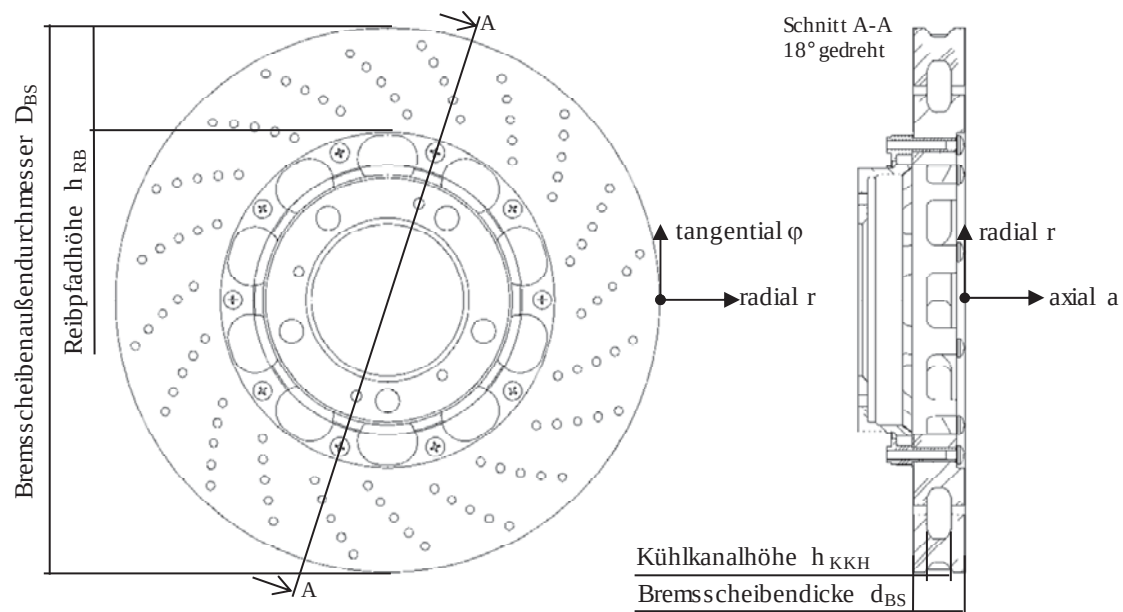


Abbildung 1-3: Maßgebliche, die Dimensionierung von Bremsscheiben beschreibende geometrische Merkmale und in dieser Arbeit verwendetes Koordinatensystem, dargestellt am Beispiel der Referenzvariante.

Nachfolgend wird ein Gesamtkonzept zur Umsetzung dargestellt und unter Berücksichtigung funktionaler, fertigungsspezifischer und wirtschaftlicher Faktoren diskutiert.

Abschließend werden die wichtigsten Punkte zusammengefasst und zukünftiger Forschungsbedarf aufgezeigt (Kapitel 7).

2 BREMSSCHEIBEN - STAND DER TECHNIK

Bremsscheiben gehören mit zu den wichtigsten Sicherheitsbauteilen im Fahrzeug. Neben den Aufgaben das Fahrzeug sicher abzubremsen, die entstehende Wärme aufzunehmen, zwischenzuspeichern und anschließend möglichst schnell wieder abzugeben, nutzen moderne Regelsysteme einen kurzzeitigen Bremseneingriff zur Verbesserung der Fahrsicherheit und -dynamik. Steigende Antriebsleistungen, hohe Geschwindigkeiten, die gestiegenen Fahrzeuggewichte und der Zwang zum Leichtbau erfordern deshalb temperaturstabile, verschleißfeste und leichte Werkstoffe für Bremsscheiben. Einen ganz erheblichen Einfluss auf die Reibwertcharakteristik und die Verschleißbeständigkeit hat die Auswahl geeigneter Bremsscheibenwerkstoffe. Die Konstruktion der Bremsscheibe und deren Integration in das Gesamtfahrzeug spielen eine weitere bedeutende Rolle für leistungsfähige Bremssysteme. Für einen ersten Überblick werden nachfolgend verfügbare Bremsscheibenwerkstoffe sowie bekannte Bauweisen von Scheibenbremsen beschrieben.

2.1 Bremsscheibenwerkstoffe

Gusseisen mit Lamellengrafit, auch Grauguss genannt, hat sich seit Jahrzehnten als kostengünstiger Bremsscheibenwerkstoff mit ausgewogenem Eigenschaftsprofil bewährt und wird heute millionenfach im Fahrzeugbau verwendet. Hauptnachteil ist aber das hohe Gewicht von Bremsscheiben aus Grauguss. Zur Gewichtsreduzierung sind metallische bzw. keramische Verbundwerkstoffe verfügbar. Zur Verdeutlichung der werkstoffspezifischen Unterschiede werden diese Bremsscheibenwerkstoffe und ihre herstellungsbedingten bzw. anwendungsspezifischen Besonderheiten näher beschrieben.

2.1.1 Gusseisen mit Lamellengrafit (GJL)

Die üblich verwendeten Gusseisensorten enthalten neben Eisen (Fe) als Legierungselement auch 2 bis 5% Kohlenstoff (C), liegen nahe bei der eutektischen Zusammensetzung im Fe-C-System und besitzen niedrige Schmelztemperaturen im Bereich von 1250°C bis 1150°C [1]. Das Schwindmaß beim Gießen ist mit ca. 1% gering [1], die Schmelze ist dünnflüssig, gut gießbar und besitzt ein sehr gutes Formfüllungsvermögen, besonders wichtig für die Herstellung leistungsfähiger innenbelüfteter Bremsscheiben mit geringen Wandstärken und zusätzlicher Verrippung im Kühlkanal.

Die Dichte ist legierungsabhängig und liegt bei 7,1 -7,2 g/cm³. Für hohe Festigkeiten und geringe Verschleißwerte wird bei Gusseisen ein perlitisches Grundgefüge angestrebt [1, 2]. Die Bildung des sehr viel weichen ferritischen Gefüges wird über spezielle Legierungselemente und die Abkühlgeschwindigkeit verhindert bzw. gesteuert [3]. Tabelle 2-1 gibt einen Überblick der Eigenschaften wichtiger Vertreter dieser Werkstoffklasse, bezeichnet nach Festigkeitsklassen.

Neben den vielfältigen Möglichkeiten Gusseisen mit Hilfe der Hauptbestandteile und herstellungspezifischer Gießparameter einzustellen, bieten zusätzliche Legierungselemente wie beispielsweise Chrom (Cr), Molybdän (Mo) und Nickel (Ni) die Möglichkeit, die Werkstoffeigenschaften weiter zu optimieren. Das Zulegieren von Cr bewirkt beispielsweise eine Steigerung der Härte und Verschleißbeständigkeit durch Karbidbildung [3]. In Kombination mit Cr wird für dickwandige Bauteile häufig Mo zur Festigkeitssteigerung eingesetzt [3]. Aufgrund der relativ langsamen Abkühlgeschwindigkeit wird dadurch auch die ungewünschte Ferritbildung verhindert.

Tabelle 2-1: Eigenschaften verschiedener unlegierter Graugussorten mit lamellaren Grafit eingelagerungen bei Raumtemperatur [4].

Grauguss-Sorte			EN-GJL-150 (GG-15) ^a	EN-GJL-200 (GG 20) ^a	EN-GJL-250 (GG 25) ^a
Werkstoffnummer			5.2100	5.1300	5.1301
Grundgefüge	-	-	ferritisch-perlitisch	perlitisches	perlitisches
Dichte	ρ	g/cm ³	7,10	7,15	7,20
Zugfestigkeit	R_m	N/mm ²	150 bis 250	200 bis 300	250 bis 350
0,1 %-Dehngrenze	$R_{p0,1}$	N/mm ²	98 bis 165	130 bis 195	165 bis 228
Bruchdehnung	A	%	0,8 bis 0,3	0,8 bis 0,3	0,8 bis 0,3
Druckfestigkeit	σ_D	N/mm ²	3,40 · R_m	3,18 · R_m	3,01 · R_m
Biegefestigkeit	σ_B	N/mm ²	1,82 · R_m	1,73 · R_m	1,66 · R_m
Scherfestigkeit	σ_S	N/mm ²	170	230	290
Elastizitätsmodul	E	kN/mm ²	78 bis 103	88 bis 113	103 bis 118
Bruchzähigkeit	K_{IC}	N/mm ^{3/2}	320	400	480
Poisson-Zahl	ν	-	0,26	0,26	0,26
Wärmekapazität	$c_{20^\circ C}$	J/(kg · K)	460	460	460
TAK	$\alpha_{20-200^\circ C}$	$\mu m/(m \cdot K)$	11,7	11,7	11,7
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda_{100^\circ C}$	W/(m · K)	52,5	50,0	48,5

^a Mechanische Kennwerte gültig für getrennt gegossene Proben

Die Eigenschaften der Graugussorten hängen nicht nur von der chemischen Zusammensetzung, sondern auch von der Form und Verteilung des Grafits ab. Grafit kristallisiert durch seine hexagonale Schichtstruktur bevorzugt plattenförmig [1]. Der Kohlenstoff liegt deshalb überwiegend in Form von dünnen, unregelmäßig geformten Lamellen im Gefüge vor (Abbildung 2-1, links). Einerseits vorteilhaft für eine hohe Wärmeleitfähigkeit, wirken die Lamellen bei Zugbelastung jedoch wie innere Kerben und führen im Vergleich zur Druckfestigkeit zu deutlich geringeren Festigkeiten und einem spröden Bruchverhalten (Abbildung 2-1, rechts).

Wegen der geringen Eigenfestigkeit des Grafits sind grobe Ausscheidungen unabhängig von ihrer Gestalt ungünstiger als feine [1]. Günstig sind deshalb kleine Lamellen und deren gleichmäßige Verteilung im Gefüge. Werden die Lamellen zu groß oder treten sie gehäuft, z. B. in Nestern auf, so verursachen sie eine verschärfte Kerbwirkung und die Zugfestigkeit des Werkstoffs sinkt [1].

stärkte Werkstoffe kostengünstiger und leichter verarbeitbar. Zur Herstellung sind sowohl pulver- als auch schmelzmetallurgische Verfahren bekannt [11].

Vor allem das Einrühren von Keramikpartikeln in metallische Schmelzen und anschließendes Vergießen mit herkömmlicher Gießtechnik, eröffnete die Möglichkeit zur Kommerzialisierung. Entwickelt wurde dieses Stir-Casting-Verfahren maßgeblich von DURALCAN (USA). Eine weitere gießtechnische Verfahrensvariante ist von LANXIDE (USA) bekannt (Abbildung 2-2).

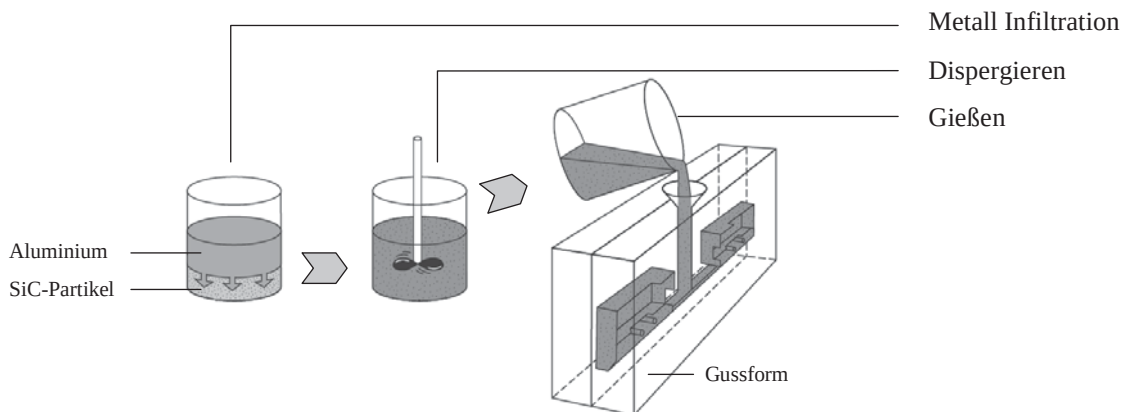


Abbildung 2-2: Gießtechnische Herstellung von Al-MMC-Bauteilen nach dem von LANXIDE (USA) entwickelten Primex Cast Prozess [12].

Als Verstärkung für Bremsenanwendungen hat sich Siliziumkarbid (SiC) etabliert. Die in die Aluminiummatrix eingelagerten SiC-Partikel erhöhen die Verschleißbeständigkeit, den E-Modul und die Temperaturfestigkeit [11]. Der Volumenanteil an Keramikpartikeln liegt normalerweise im Bereich von 10-30% (Tabelle 2-2).

Mit zunehmendem Volumenanteil und Partikelgröße nimmt dabei die Verschleißrate ab [13]. Hohe SiC-Gehalte sind verfahrenstechnisch, aufgrund der schlechteren Gießbarkeit, nicht vorteilhaft. Problematisch ist auch die mechanische Bearbeitung durch Drehen, Fräsen und Bohren. Die eingelagerten Hartstoffe wirken als Verschleißmittel und führen zu einem erhöhten Verschleiß der Bearbeitungswerkzeuge.

Werkstoffspezifischer Vorteil von Al-MMC ist deren hohe Wärmeleitfähigkeit von deutlich über 100 W/mK, die zu einer homogenen Temperaturverteilung in der Bremsscheibe führt. Allerdings birgt die hohe Wärmeleitfähigkeit das Risiko einer höheren Temperaturbelastung im Naben- und Radlagerbereich durch Ableitung der entstehenden Wärme über den Brems-scheibentopf.

Tabelle 2-2: *Eigenschaften verschiedener Al-MMC-Werkstoffe im Vergleich zu unverstärktem Aluminium bei Raumtemperatur [14, 15].*

MMC-Werkstoff			DURALCAN F3S.10S-T6	DURALCAN F3S.20S-T6	LANXIDE 91-X-1060-30P-T6
Legierung			AlSi7Mg	AlSi9Mg	AlSi9Mg
SiC-Partikelgehalt			ohne	+10 Vol.% SiC	+20 Vol.% SiC
Werkstoffzustand			T6	T6	T6
Dichte	ρ	g/cm³	2,68	2,71	2,77
Zugfestigkeit	R _m	N/mm²	≥ 255	≥ 310	≥ 317
Dehngrenze	R _{p x}	N/mm²	≥ 200 ^b	≥ 283 ^b	≥ 310 ^b
Bruchdehnung	A	%	6,0	1,2	0,4
Elastizitätsmodul	E	kN/mm²	75,2	86,2	98,6
Bruchzähigkeit	K _{IC}	N/mm ^{3/2}	17,4	17,4	15,9
Rockwellhärte ^a	HR	-	55	73	77
Wärmekapazität	c _p	J/(kg·K)	-	ca. 880 ^d	ca. 840 ^d
TAK	α	µm/(m·K)	21,4 ^f	20,7 ^f	17,5 ^f
Wärmeleitfähigkeit	λ	W/(m·K)	ca. 150 ^g	-	ca. 185 ^h
					160 ^e

^a ermittelt nach dem Rockwell-B-Verfahren

^b bei 0,20%

^c bei 0,01%

^d bei 25°C

^e bei 21°C

^f von 50-100°C

^g von 21-100°C

^h bei 100°C

Hauptproblematik bei der Verwendung von MMC-Bremsscheiben sind die Besonderheiten im Reibverhalten, resultierend aus der Wechselwirkung zwischen Reibbelag, Bremsscheibe und Bremsbelastungsniveau [16, 17]. MMC-Bremsscheiben weisen ein insgesamt niedrigeres Reibwertniveau im Vergleich zu Graugussbremsscheiben auf. Wiederholbremsungen und die zunehmende Erwärmung über 200°C führen bereits zu einer deutlichen Abnahme des Reibwerts durch Bildung von Transferschichten des Reibbelags auf der Bremsscheibe. Die Dicke der Transferschichten liegt im Bereich ein- bis zweistelliger µm-Werten [16]. Durch eine weitere Zunahme der Temperatur wird die Anhaftung von Reibbelagmaterial begünstigt. Reibung findet somit hauptsächlich zwischen der Transferschicht und dem Reibbelag statt.

Spezielle Beschichtungen zur Verbesserung der Reibwert- und Temperaturproblematik wurden zwar entwickelt [7, 18], konnten jedoch die begrenzte Verwendung von MMC-Bremsen nicht maßgeblich erweitern.

MMC-Bremsscheiben bzw. -trommeln sind bisher nur für Schienenfahrzeuge [19] und aus sehr leichten Fahrzeugen wie z. B. dem LOTUS Elise S1 (Fahrzeuggewicht 690 kg), dem VW Lupo-3L (Fahrzeuggewicht um 830 kg) und dem CHRYSLER Plymouth Prowler (Fahrzeuggewicht um 1270 kg) bekannt [20, 21, 22]. Ausschlaggebend für deren Einsatz war die Gewichtersparnis von 50-60% gegenüber herkömmlichen Graugussbremsscheiben. Aufgrund der hohen Kosten, der tribologischen Besonderheiten und der geringen Temperaturfestigkeit haben sich MMC-Bremsscheiben bisher aber im Fahrzeugbau nicht durchsetzen können [23].