

SGL BRAKES GmbH



Präsentation

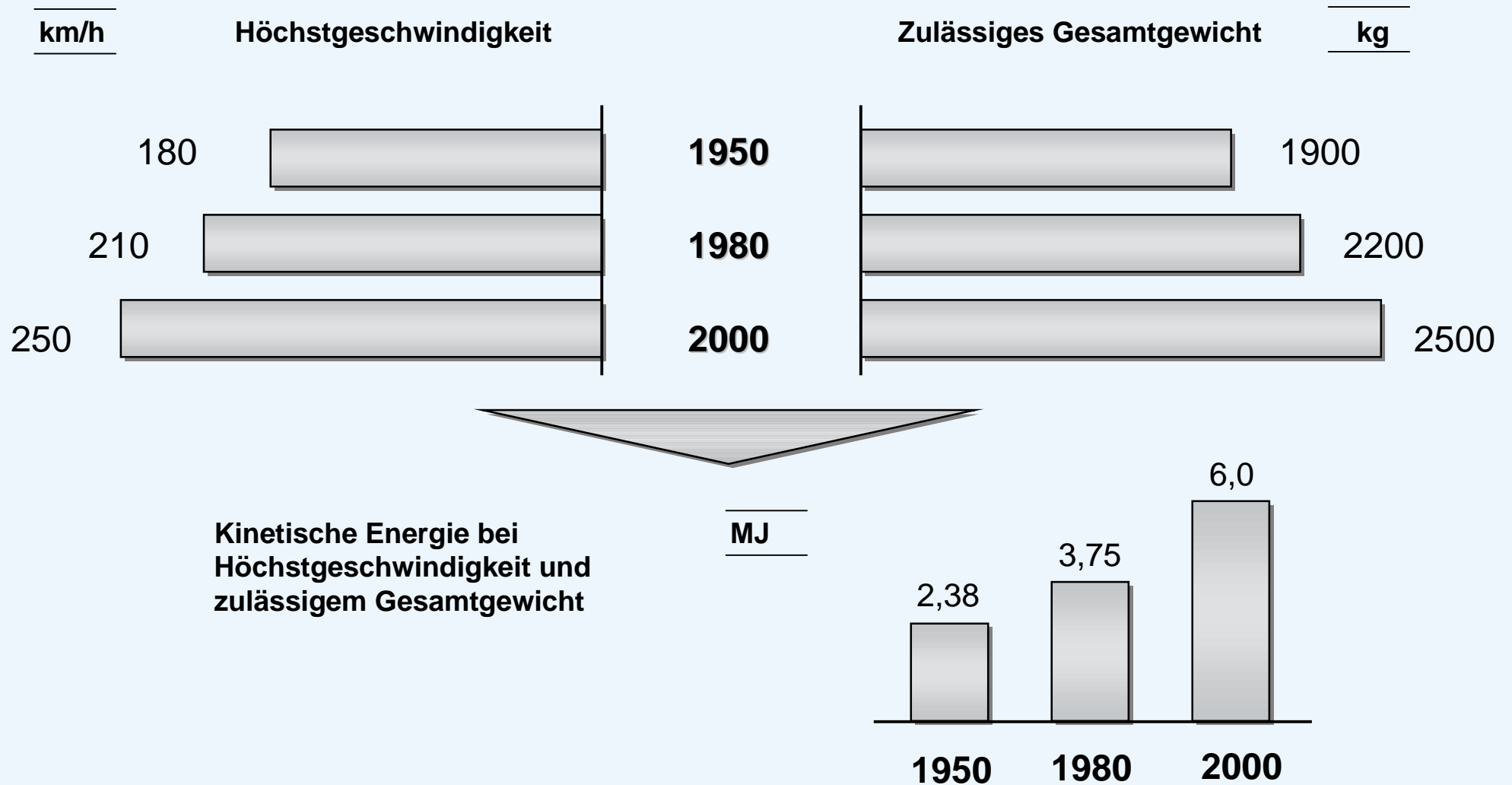
Carbon-Keramik-Bremsscheibe

INHALT

- Steigende Anforderungen an Hochleistungsbremssysteme
- Faserverstärkte Keramik als Antwort
- Serieneinsatz von faserverstärkten Keramikbremsscheiben
- Anhang

Die Anforderungen an Hochleistungsbremssysteme im Automobil steigen überproportional an.

Beispiel für durchschnittliche Oberklassenlimousine



Gerade in den Top-Fahrzeugsegmenten werden besondere Herausforderungen an die Hochleistungsbremssysteme gestellt.

- Supersportwagen mit Höchstgeschwindigkeiten von über 300 km/h mit modernster Renntechnik
(Preis > 150,000 €)
- Luxuslimousinen mit hoher Motorleistung und ständig steigenden zulässigen Gesamtgewichten aufgrund wachsender Komfort- und Sicherheitsmerkmale
(Preis > 70,000 €)
- Luxury Sports Utility Vehicle mit höchster Motorleistung und zulässigem Gesamtgewicht auf Kleinlasterniveau - „Rennwagen fürs Gelände“
(Preis > 90,000 €)

Die abzubremsenden kinetischen Energien im Top-Fahrzeugsegment steigen bis auf 9 MJ an.



VW Phaeton W12



Porsche Cayenne Turbo



Mercedes SLR



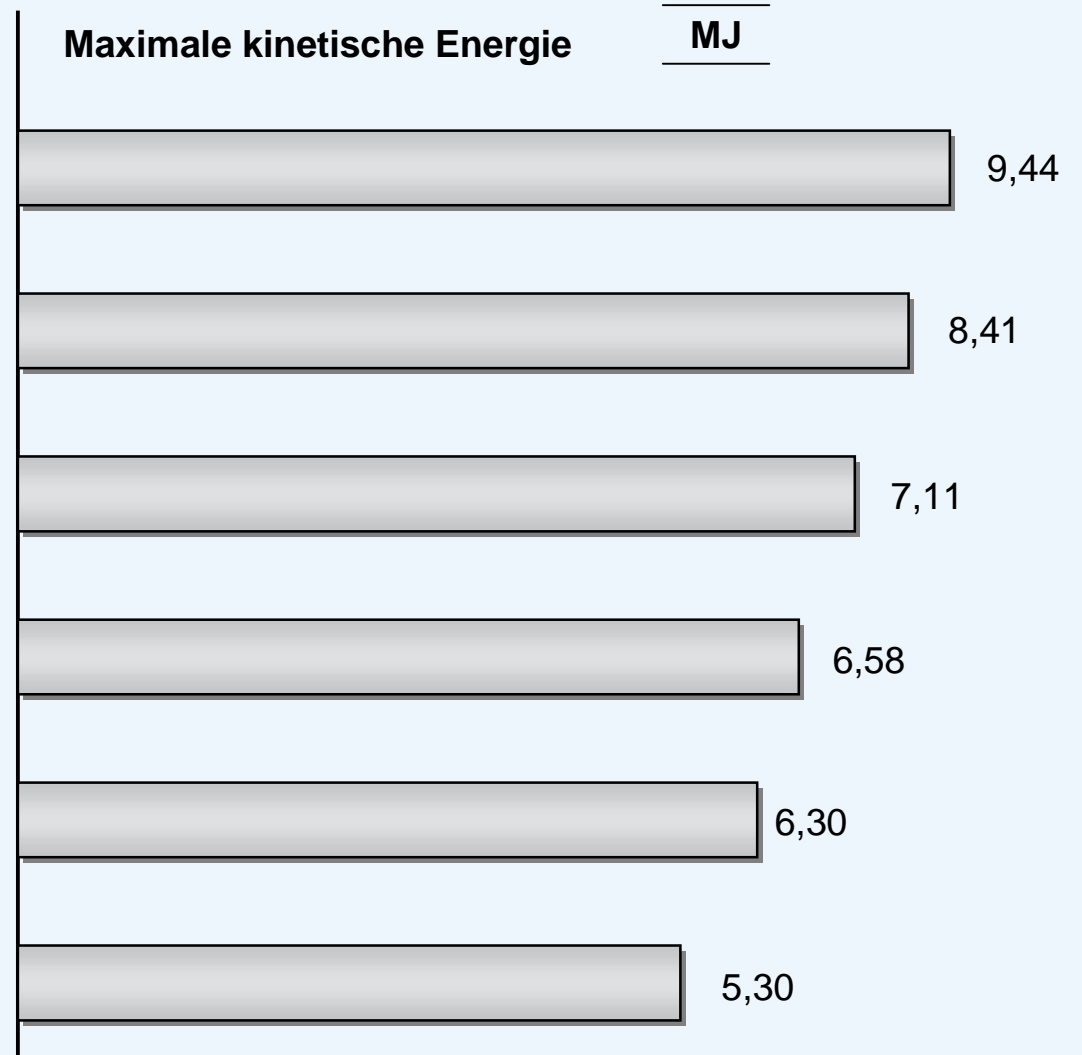
Porsche GT2



Porsche Carrera GT



**Mercedes CL 55 AMG F1
Limited Edition**



Im Marktsegment der Supersportwagen sind die meisten Premium Marken Automobilhersteller vertreten oder erwägen einen Markteintritt mit neuen Modellen, die höchste Anforderungen an die Bremssysteme stellen.



Mercedes SLR



VW Nardo W12



Porsche GT2



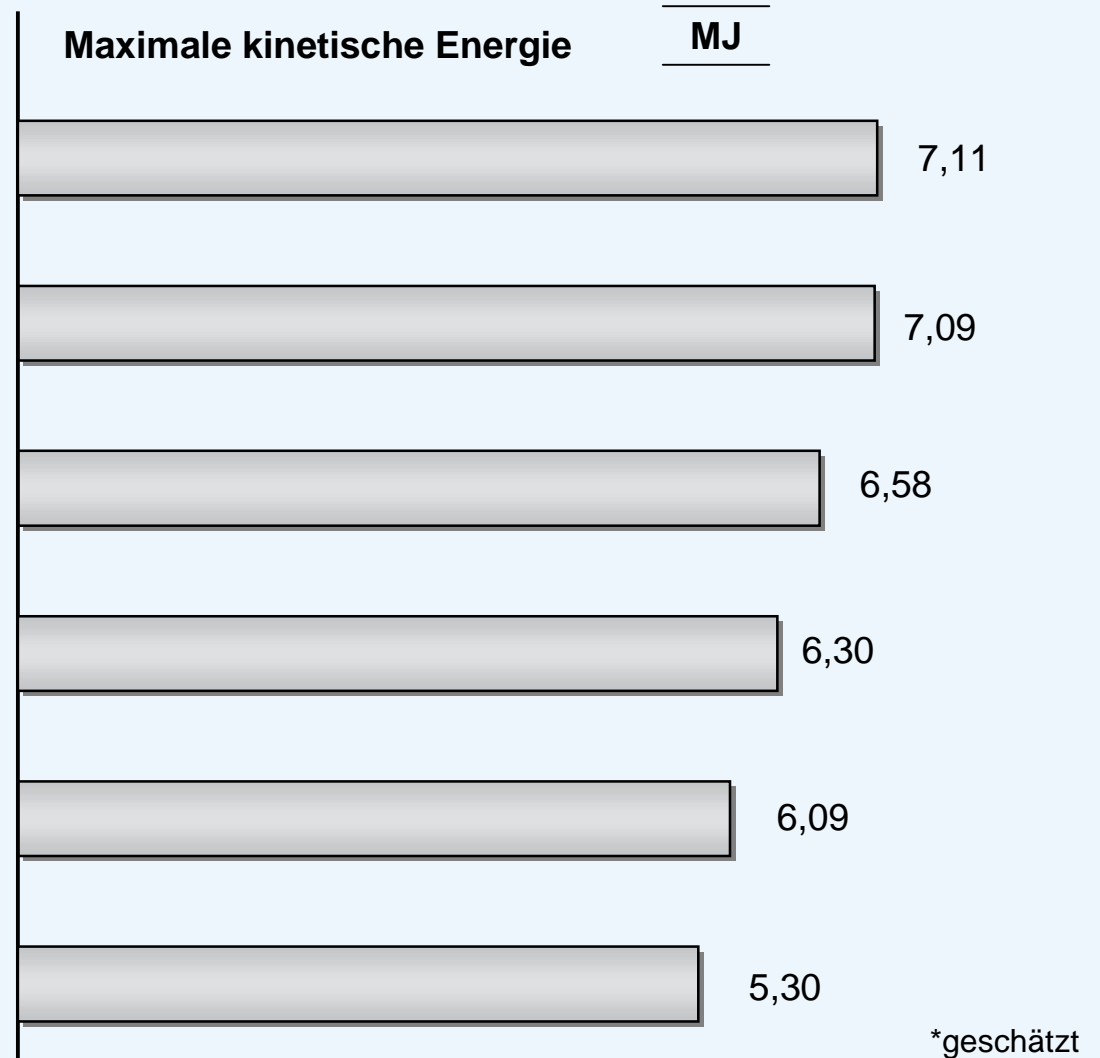
Porsche Carrera GT



Ferrari Enzo Ferrari*



Mercedes CL 55 AMG F1 Limited Edition



Luxuslimousinen erreichen heute Fahrleistungen, die denen von Sportwagen früherer Tage entsprechen. Dadurch sind auch hier die zu beherrschenden kinetischen Energien sehr hoch.



VW Phaeton W12



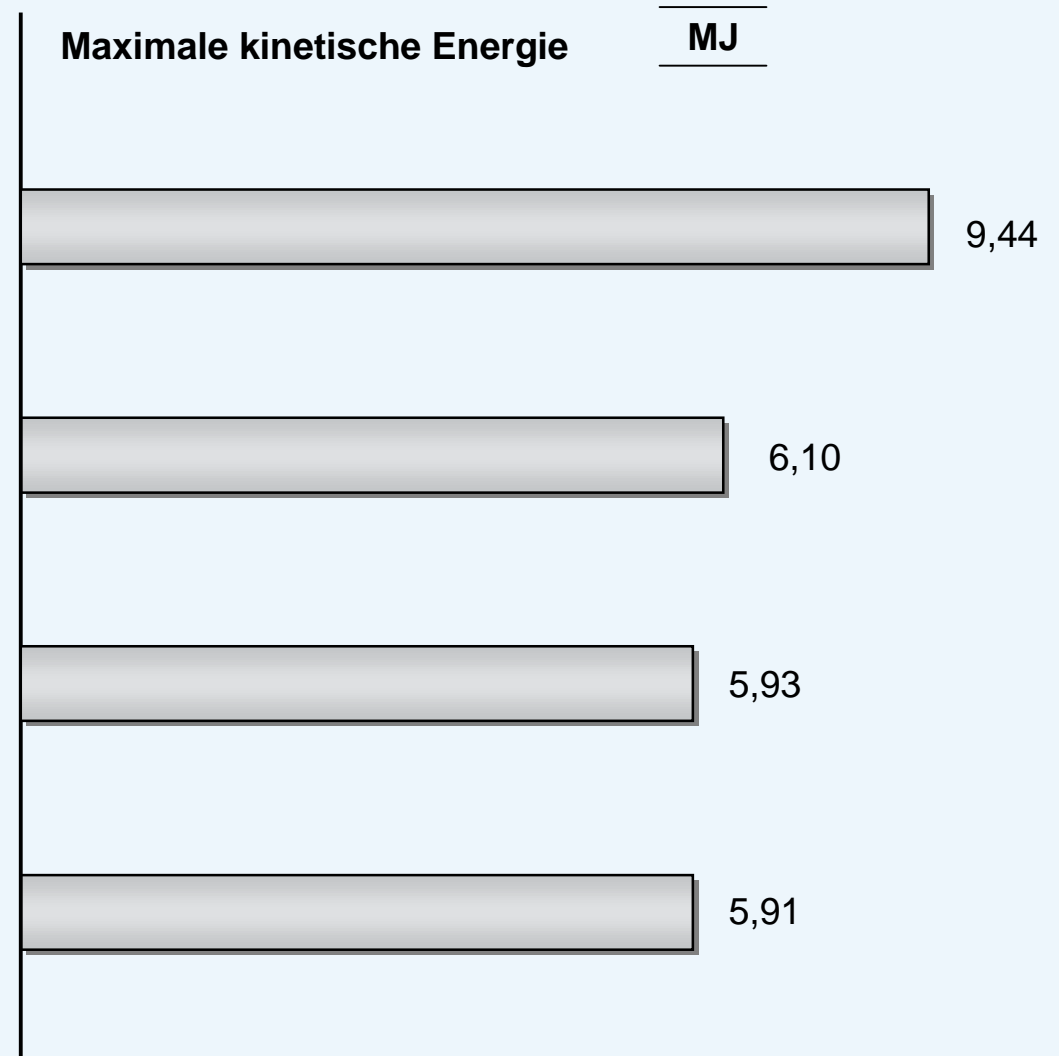
**Audi A8 6.0
Tiptronic Quattro**



Mercedes S 600



BMW 745 iL



Im neuen Marktsegment der Luxury Sports Utility Vehicle sind die Herausforderungen an die Bremssysteme ebenfalls extrem, da exzellente Geländegängigkeit mit den Fahrleistungen eines Sportwagens kombiniert werden.



Porsche Cayenne Turbo



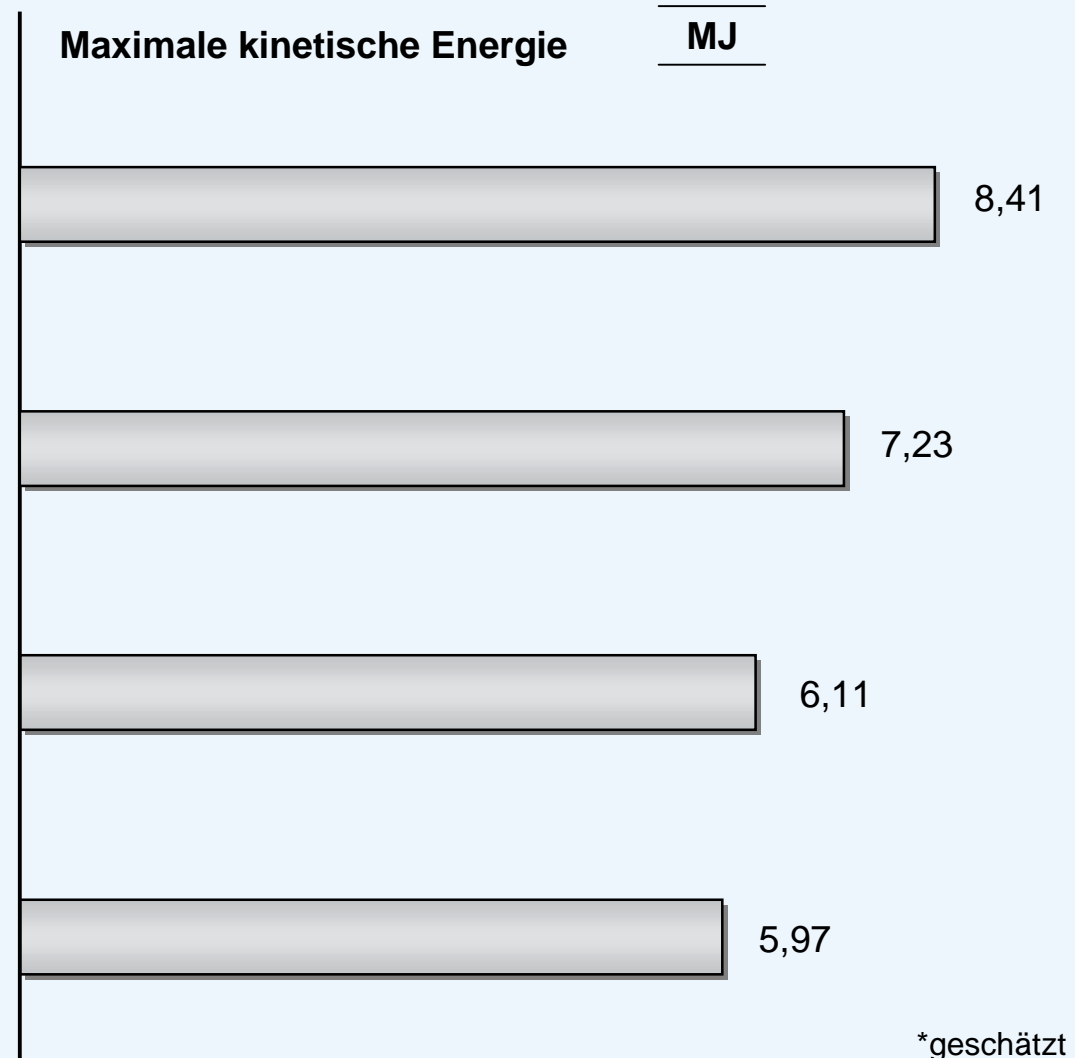
VW Touareg*



Mercedes ML 55 AMG



BMW X5 4.6 is



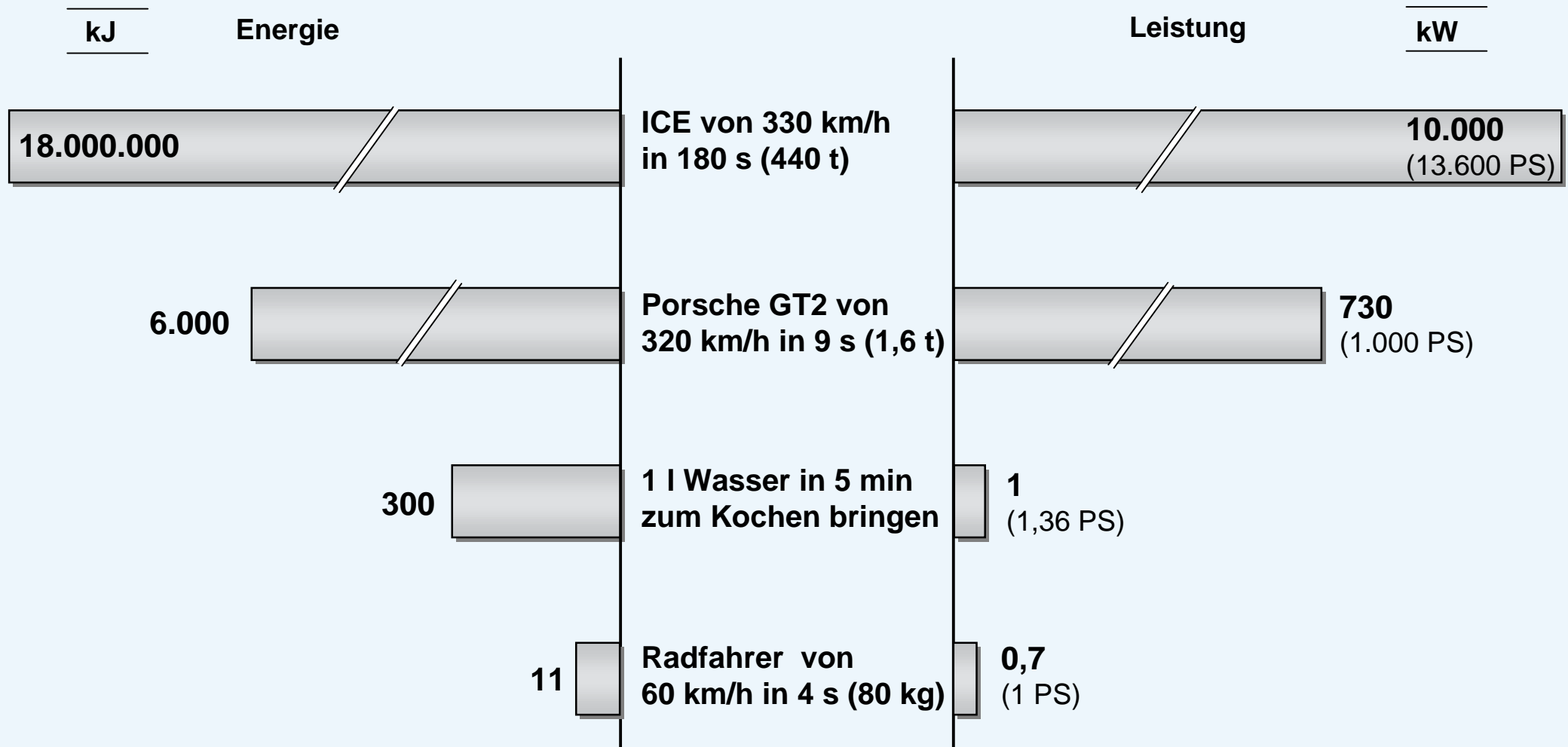
Mit höheren Gesamtgewichten und schnelleren Fahrzeugen steigen die Anforderungen an Bremsscheibe und -belag stark an.

Mögliche Auswirkungen sind:

- Erhöhter Verschleiß
- Verzug durch thermische Überbeanspruchung, verschlechterte Komfoteigenschaften (Heißrubbeln)
- Bauteilversagen (Risse) durch Thermoschock
- Fading

Zusätzlich stellen die Automobilhersteller immer höhere Anforderungen an die Lebensdauer, um die Serviceintervalle zu erhöhen oder Wartungskosten zu reduzieren.

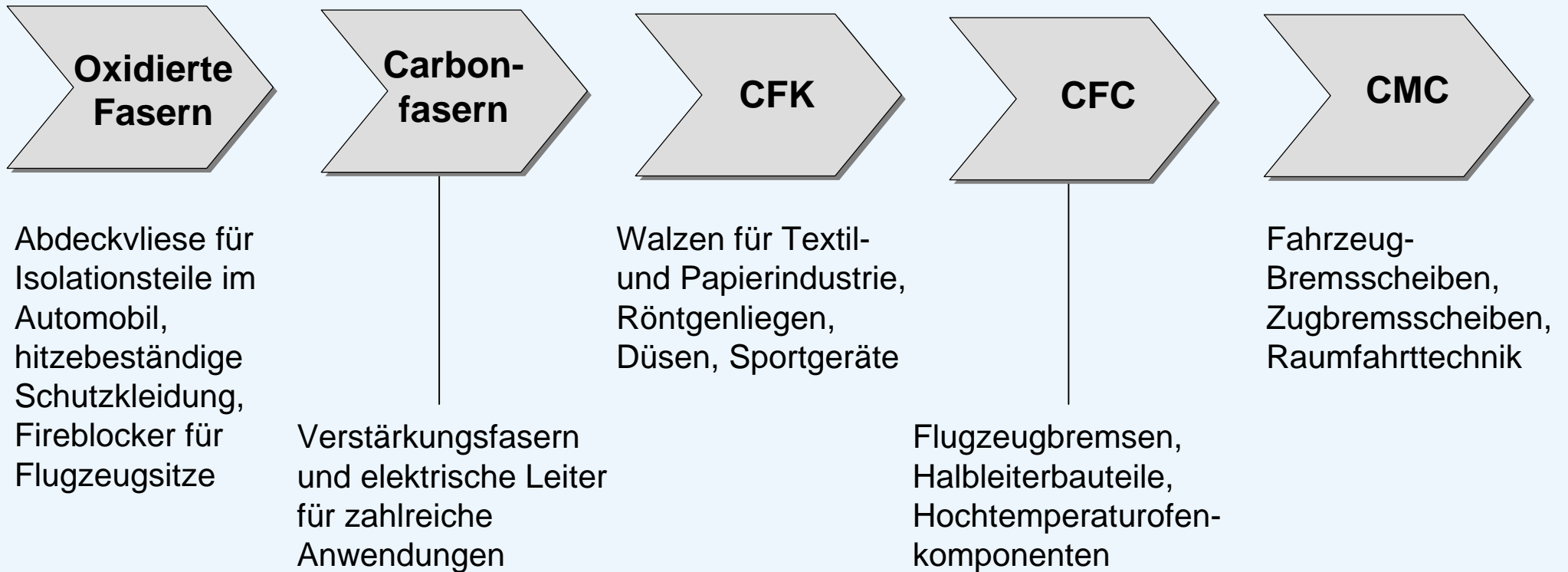
Vergleich der für Vollbremsungen notwendigen Energien und Leistungen.



INHALT

- Steigende Anforderungen an Hochleistungsbremssysteme
- Faserverstärkte Keramik als Antwort
- Serieneinsatz von faserverstärkten Keramik-Bremsscheiben
- Anhang

Neben den Ceramic Matrix Composites (CMC) Werkstoffen basieren eine Vielzahl anderer Werkstoffe auf oxidierten Polyacrylnitril (PAN) Fasern.



- CFK = Kohlenstoffaserverstärkter Kunststoff
- CFC = Kohlenstoffaserverstärkter Kohlenstoff
- CMC = Kohlenstoffaserverstärkte Keramik

Zur Herstellung von Hochleistungs-Bremsscheiben wird der CMC Werkstoff C/SiC verwendet.

- C/SiC ist ein Carbonfaserverstärktes Siliziumcarbid. Es besteht aus der Verstärkungskomponente Carbonfaser sowie einer Si und SiC Matrix.

- Für die Fahrzeug-Bremsscheibe wird die Kohlenstoff-Kurzfaservariante verwendet.

SGL BRAKES ist weltweit der einzige Automobilzulieferer, der in Serie Carbon-Keramik-Bremsscheiben liefert.

Harz + Carbonfasern

Mischen

Formgebung

Härten

Carbonisieren

Bearbeiten

Silizieren

Schleifen

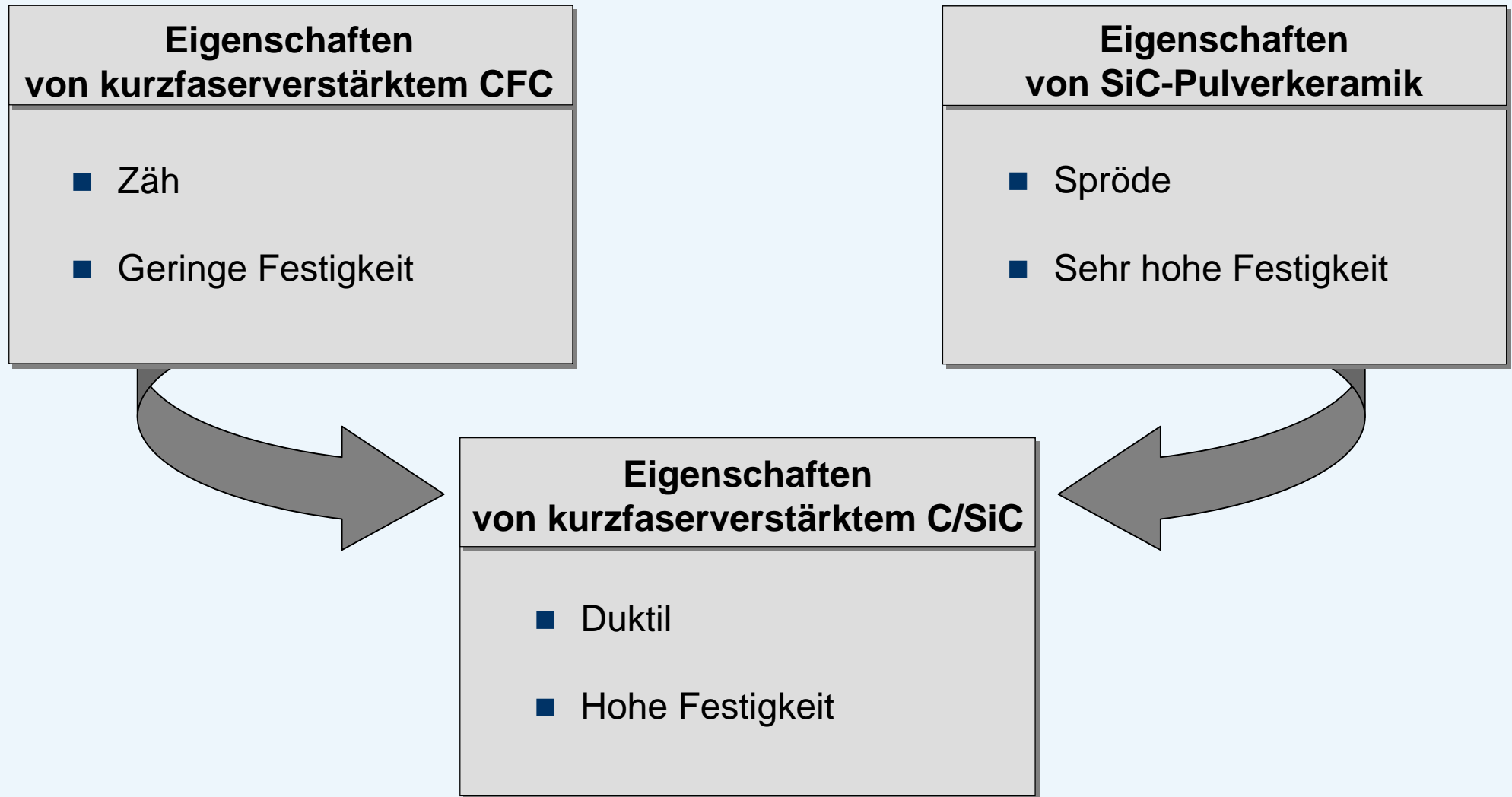


Der Formkörper wird im Presswerkzeug bei 150 °C ausgehärtet und stabilisiert das Bauteil. Anschließend wird bei 900 °C carbonisiert. Die im Porenstruktur wird mit schmelzflüssigem Silizium bei über 1.400 °C infiltriert.

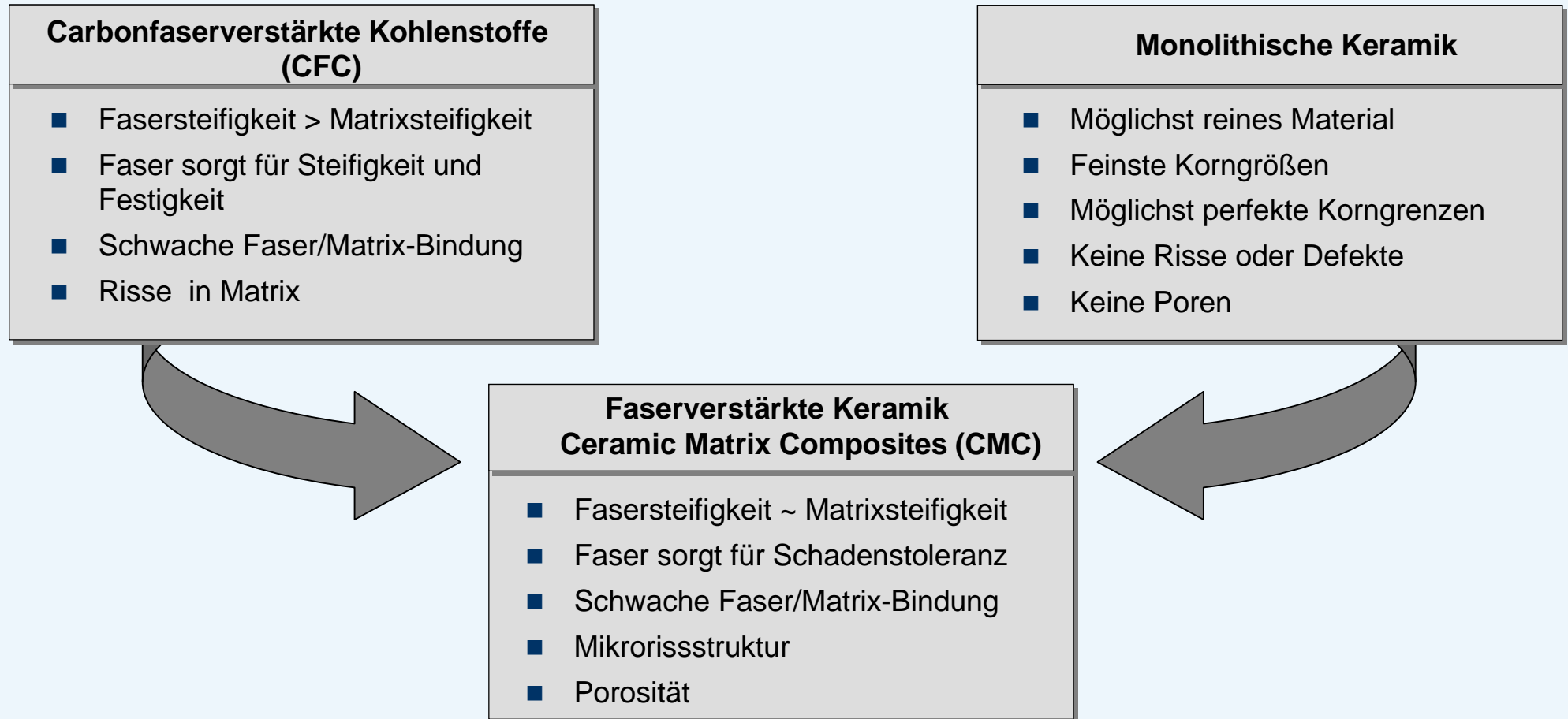
Das flüssige Silizium reagiert mit Kohlenstoff zu Siliziumcarbid. Eine auf die Carbonfaser aufgebrachte C-Schicht reagiert mit dem Silizium, so dass eine SiC-Schutzhülle um die Faser entsteht.

Das entstandene C/SiC-Material behält dadurch seine Duktilität. Aufgrund seiner hohen Härte lässt sich der Werkstoff anschließend nur mit Diamant-Werkzeugen bearbeiten.

Idealerweise kombiniert der Bremsenwerkstoff die positiven Eigenschaften von faserverstärkten Kohlenstoffen und monolithischen Keramiken.



Idealerweise kombiniert ein Bremsscheibenwerkstoff die positiven Eigenschaften von faserverstärkten Kohlenstoffen (hohe Schadenstoleranz) und monolithischen Keramiken.

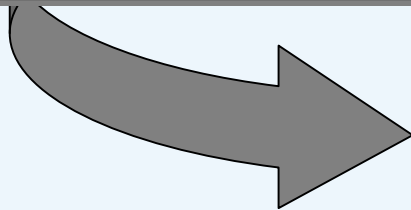


Die Carbon-Keramik-Bremsscheibe beruht auf dem neuartigen Werkstoffsystem Ceramic Matrix Composites (CMC).

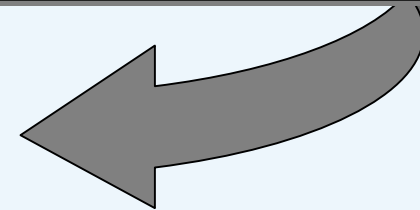
Idealerweise kombiniert ein Bremsenwerkstoff die positiven Eigenschaften von faserverstärkten Kohlenstoffen und monolithischen Keramiken.

Eigenschaften von kurzfaserverstärktem CFC
<ul style="list-style-type: none">■ Geringe Festigkeit■ Porös■ Minimale Wärmedehnung■ Zäh■ Sehr hohe Thermoschockbeständigkeit■ Schlechte Oxidationsbeständigkeit■ Geringe Verschleißfestigkeit■ Niedrige Dichte

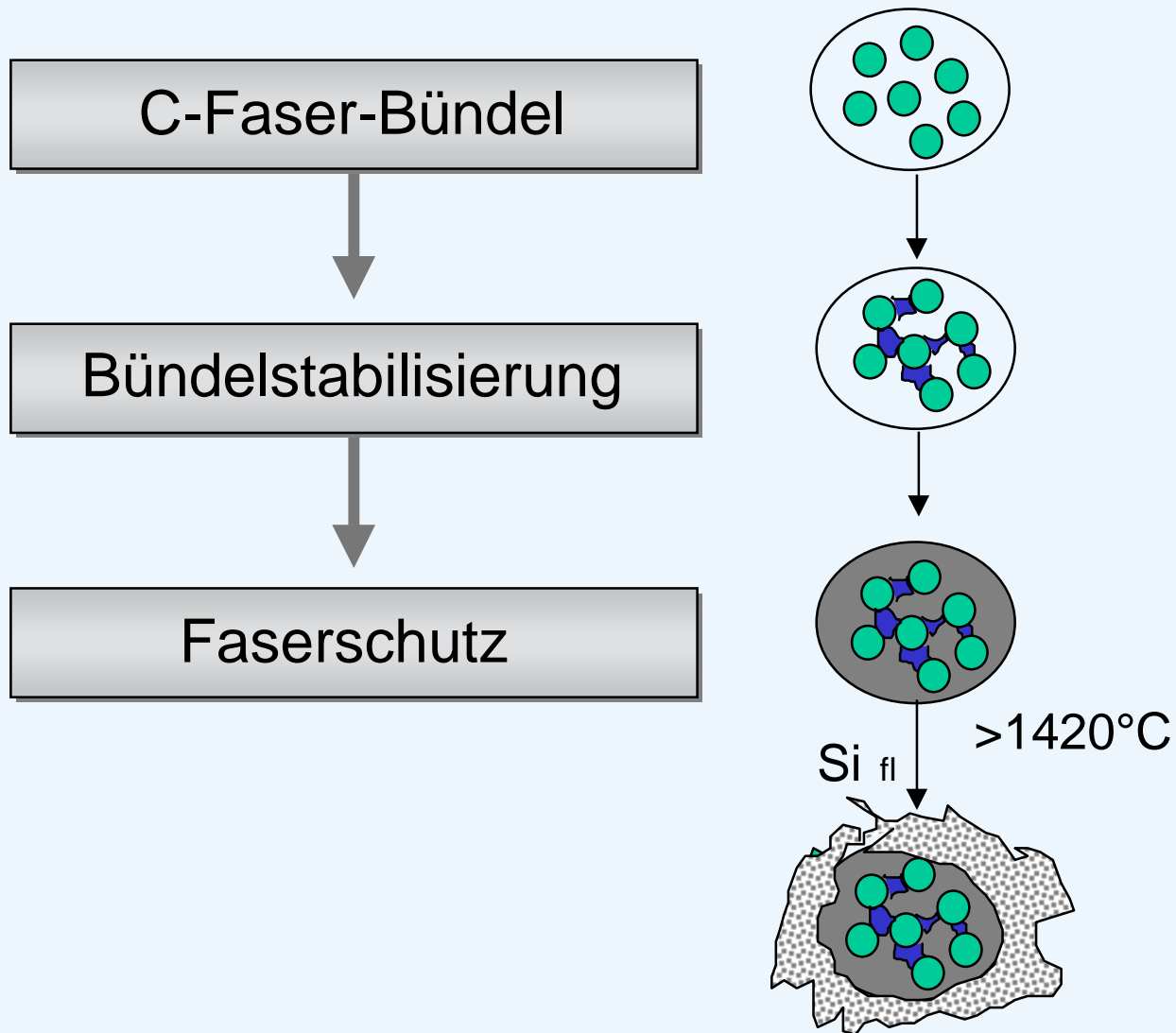
Eigenschaften von SiC-Pulverkeramik
<ul style="list-style-type: none">■ Hohe Festigkeit■ Dicht■ Mittlere Wärmedehnung■ Spröde■ Mittlere Thermoschockbeständigkeit■ Hohe Oxidationsbeständigkeit■ Sehr gute Verschleißfestigkeit■ Mittlere Dichte



Eigenschaften von kurzfaserverstärktem C/SiC
<ul style="list-style-type: none">■ Mittlere Festigkeit■ Geringe offene Porosität■ Minimale Wärmedehnung■ Gute Zähigkeit■ Hohe Thermoschockbeständigkeit■ Hohe Oxidationsbeständigkeit■ Sehr gute Verschleißfestigkeit■ Niedrige Dichte



Entscheidend für das spätere Werkstoffverhalten der Bremsscheibe ist der Schutz der Carbonfaser-Bündel während des Herstellungsprozesses. Der Faserschutz erfolgt als erster Fertigungsschritt.

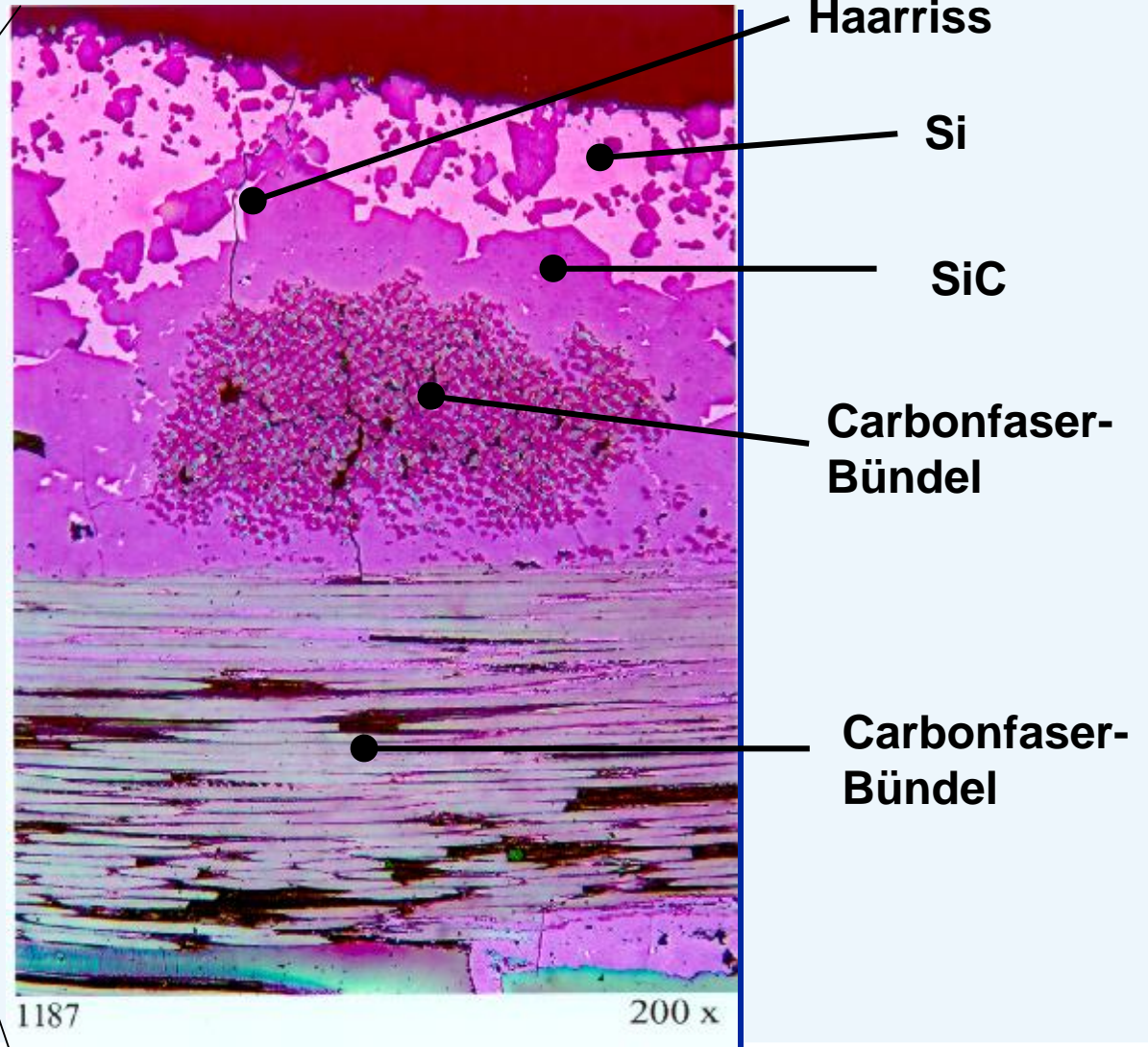


Das Kurzfaser C/SiC zeichnet sich durch eine Vielzahl hervorragender typischer Werkstoffeigenschaften aus.

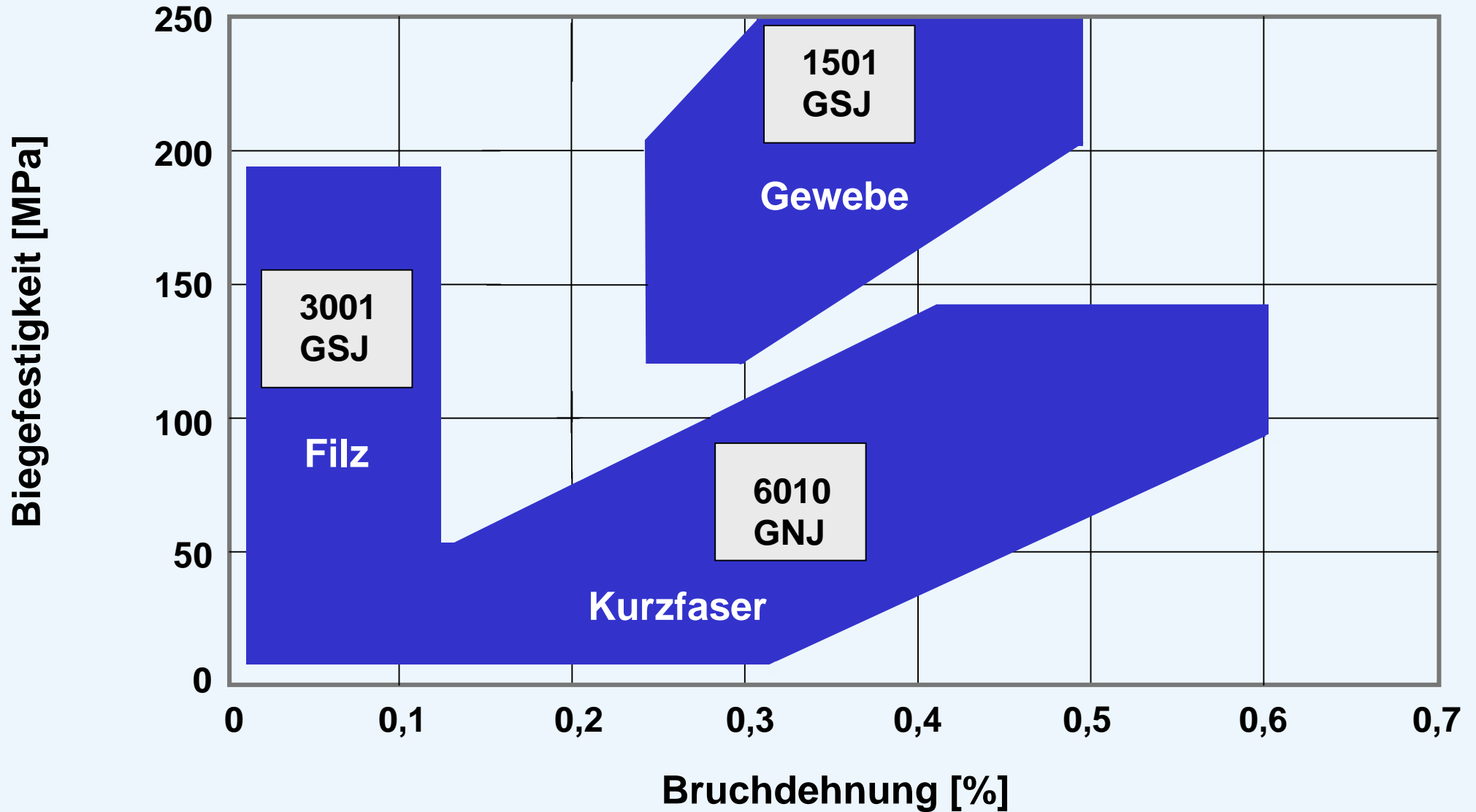
- Hohe Bruchzähigkeit (0.1 - 0.5 %)
- Geringe Dichte (2.4 g/cm³)
- Hohe Härte
- Geringer Reibverschleiß
- Biegefestigkeiten von 50 bis 150 N/mm²
- Ansteigende mechanische Eigenschaften mit zunehmender Temperatur
- Geringe Wärmedehnung ($3 \times 10^{-6}/K$ zwischen RT und 1200 °C)
- Rissverzweigung durch Carbonfaserverstärkung (Pullout Effekt)
- Hohe Thermoschockbeständigkeit
- Sehr gute Korrosionsbeständigkeit
- Hohe Wärmeleitfähigkeit

Die Werkstoffeigenschaften der Carbon-Keramik-Bremsscheibe beruhen auf der einzigartigen Kombination der Vorteile von monolithischer Keramik und faser-verstärkten Kohlenstoffen.

Riss-Stopp-Effekt durch Faserverstärkung



Die C/SiC-Werkstoffeigenschaften lassen sich durch die Wahl der Ausgangs-Carbonfasern anwendungsspezifisch einstellen.

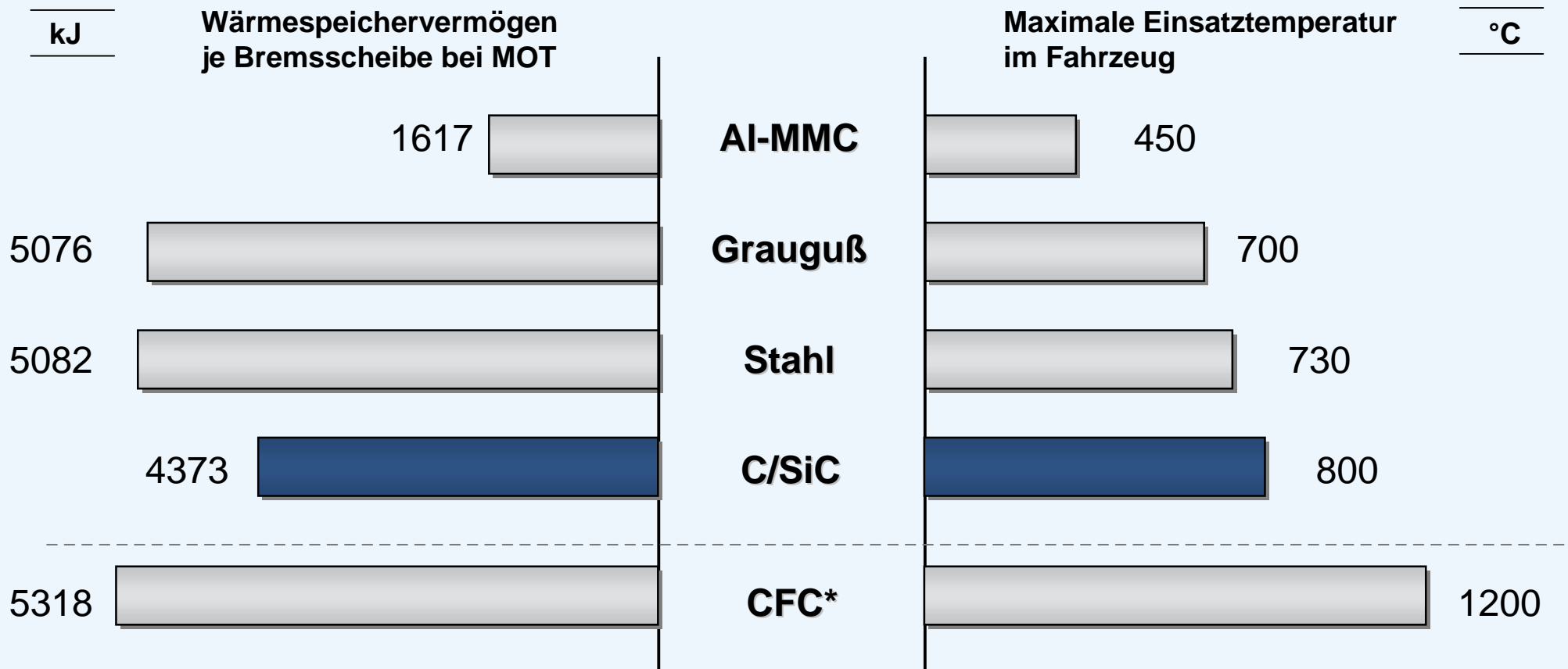


Berechnung für das Beispiel einer innenbelüfteten Bremsscheibe (\varnothing 355/229 x 35 mm)

Werte	Einheit	Grauguß	Stahl	Al-MMC	CFC	C/SiC	C/SiC
cp 100°C 0°C	kJ/kg*K	0,532	0,46	0,82	0,83	0,8	0,8
cp MOT RT	kJ/kg*K	0,65	0,58	0,85	1,6	1,45	1,45
MOT	°C	700	730	450	1200	800	900
Cp	kJ/kg	455	423,4	382,5	1920	1160	1305
Dichte	kg/dm ³	7,25	7,8	2,85	1,8	2,45	2,45
Masse der Bremsscheibe	kg	11,16	12,00	4,39	2,77	3,77	3,77
Wärmespeicher- vermögen je Bremsscheibe	kJ	5.076	5.082	1.677	5.318	4.373	4.920
Wärmekapazität	kJ/dm ³	3.299	3.303	1.090	3.456	2.842	3.197

Die theoretisch möglichen MOT für C/SiC lassen sich aufgrund der Hitzeempfindlichkeit der anderen Bremssystemkomponenten (Bremschläuche, Bremsflüssigkeit, Reifen etc.) nicht vollständig ausnutzen. Durch die geringere Dichte ist eine tendenziell größere Bremsscheibe sinnvoll.

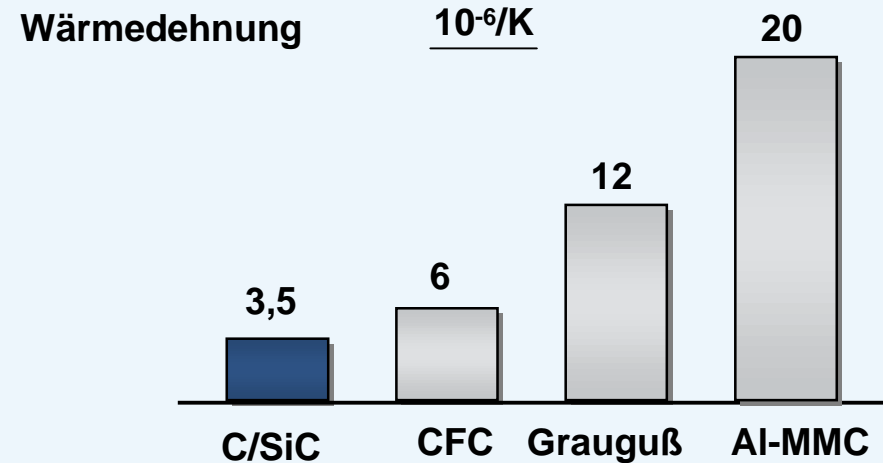
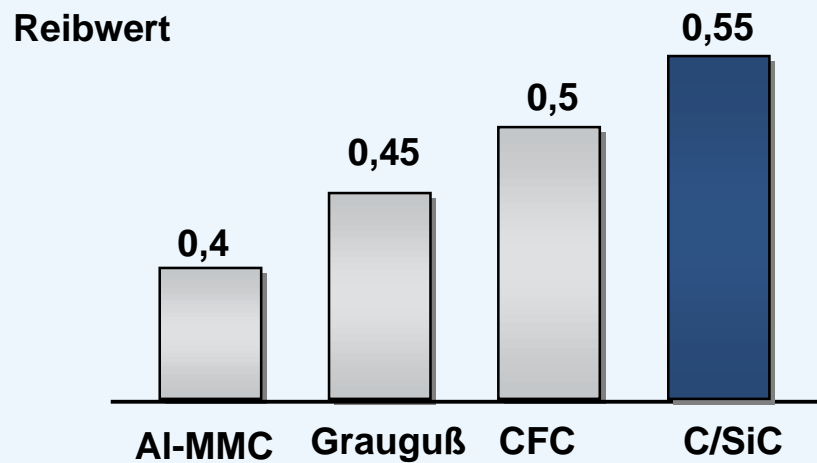
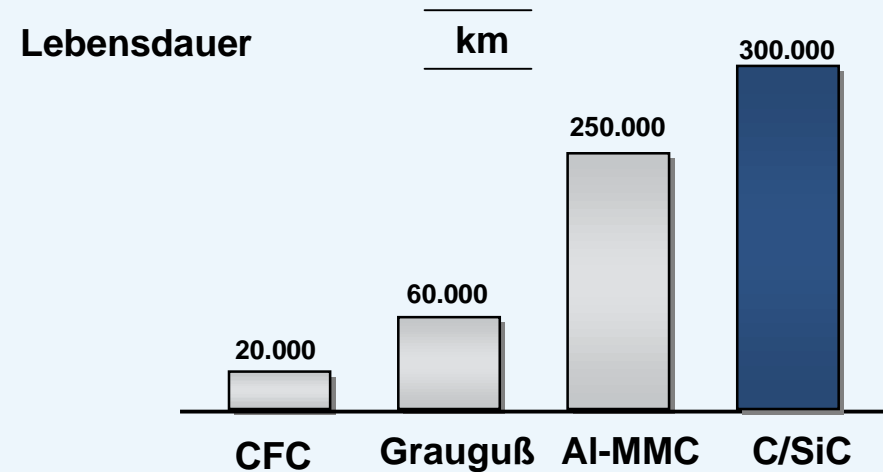
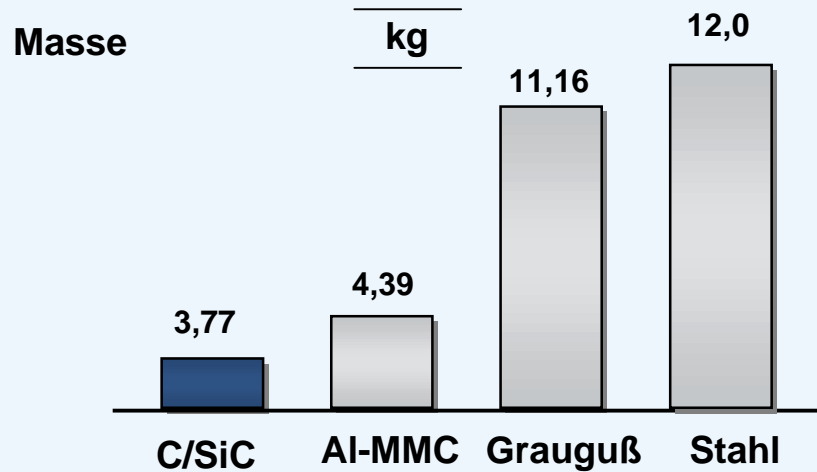
Beispiel für innenbelüftete Bremsscheibe (Ø 355/229 x 35 mm)



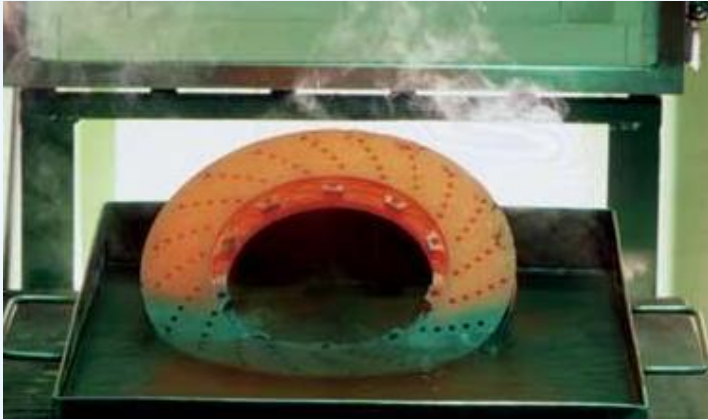
*nur in Rennfahrzeugen

Der Vergleich der mechanischen und tribologischen Eigenschaften der Carbon-Keramik-Bremsscheibe zeigt die deutlichen Vorteile des Werkstoffes in der High-Performance Anwendung.

Beispiel für innenbelüftete Bremsscheibe (\varnothing 355/229 x 35 mm)



C/SiC zeichnet sich durch die ausgezeichnete Thermoschockbeständigkeit (kein Versagen durch Rissbildung) im Vergleich zu den anderen Brems-scheibenwerkstoffen aus.

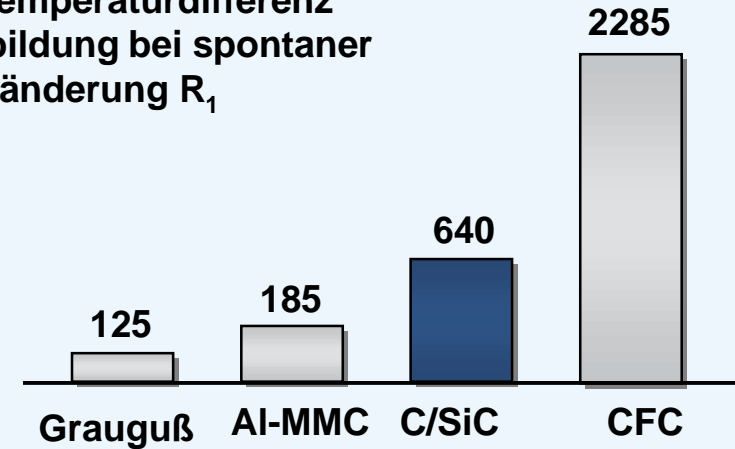


$$R_1 = \frac{R_m}{E \cdot \alpha}$$

$$R_2 = \frac{R_m \cdot \lambda}{E \cdot \alpha}$$

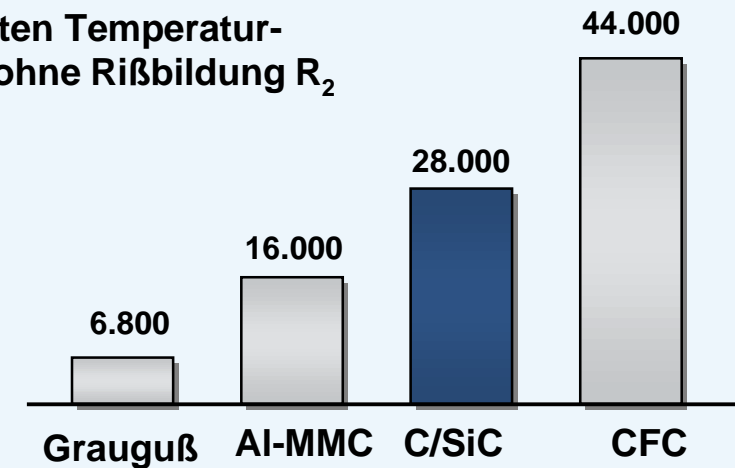
Maximale Temperaturdifferenz bis zur Rißbildung bei spontaner Temperaturänderung R_1

K



Maximale Wärmestromdichte bei konstanten Temperaturgradienten ohne Rißbildung R_2

W/m



INHALT

- Steigende Anforderungen an Hochleistungsbremssysteme
- Faserverstärkte Keramik als Antwort
- Serieneinsatz von faserverstärkten Keramikbremsscheiben
- Anhang

Auf der IAA im September 1999 wurde die Porsche Ceramic Composite Brake mit SGL Bremsscheibe erstmalig dem Fachpublikum vorgestellt.



- Porsche 911 Turbo mit C/SiC Bremsscheiben in der PCCB (Porsche Ceramic Composite Brake)
- Leistung 420 PS
- Von 0 auf 100 in 4,2 s
- Verzögerung mit 11,3 m/s²
- Bremsweg von 240 km/h auf 0 liegt bei 200 m

Die Carbon-Keramik-Bremsscheibe wird von Porsche seit Juni 2001 in der Serie eingesetzt.



- Bremssystem des Porsche 911 GT 2
- Ausstattungsoption im Porsche 911 Turbo seit Oktober 2002
- Ausstattungsoption im Porsche 911 Carrera 4S seit November 2002

Die Vorteile von Carbon-Keramik-Bremsscheiben kommen im Porsche 911 GT2 voll zum Tragen.

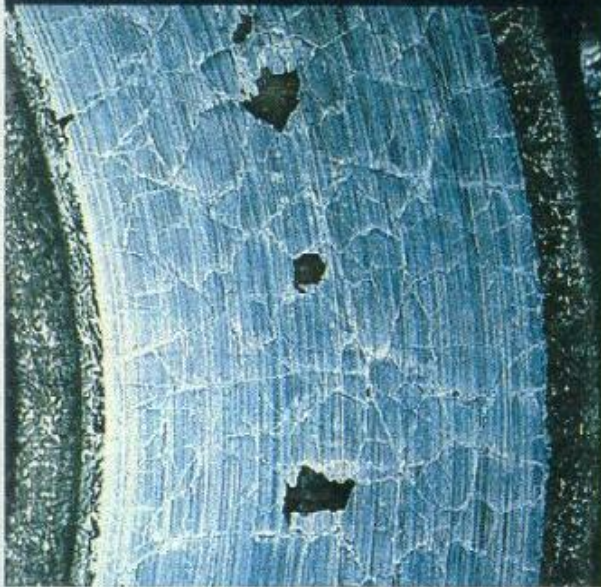
- 50% Gewichtsreduzierung ungefederter Massen gegenüber Grauguß-Bremsscheiben. Bei einem Porsche GT 2 beträgt der Gewichtsvorteil 20 kg
- Die reduzierten rotierenden und ungefederten Massen verbessern die Lenkbarkeit, die Strassenlage sowie die Lebensdauer der Stoßdämpfer
- Korrosion an den Bremsscheiben tritt nicht mehr auf
- Die hohe Verschleißfestigkeit erlaubt eine Lebensdauer von ca. 300.000 km unter normalen Fahrbedingungen im Gegensatz zu ca. 50.000 km mit einer Gusscheibe
- Durch den sehr geringen Wärmeausdehnungskoeffizienten verziehen sich die Scheiben nicht. Heißrubbeln und sog. Hot Spots treten nicht mehr auf
- Speziell für C/SiC-Scheiben entwickelte Bremsbeläge haben eine bis zu doppelt so lange Lebensdauer wie Konventionelle, nehmen kein Wasser auf und sind fadingstabil
- Der stabile und hohe Reibwert des Bremssystems führt zu einem frühen Ansprechen der Bremse und zu geringeren Pedalkräften bei Stopp Bremsungen

Die Wahl des Reibschichtwerkstoffes hat einen entscheidenden Einfluss auf Reibwertkonstanz und Lebensdauer der Bremsscheibe.

Vergleich der Reibschichten Mercedes CL 55 AMG F1 und Porsche 911 Turbo in AMS 8/2000

Keramik ist nicht gleich Keramik

MERCEDES CL 55 AMG F1



Ein Netz von kleinen Rissen durchzieht die glatte Oberfläche der Mercedes-Scheibe aus faserfreiem Siliziumkarbid. Nach den Tests zeigt die Prototypen-Scheibe – laut Mercedes unbedenkliche – Abplatzungen

PORSCHE 911 TURBO



Die Porsche-Scheibe besitzt eine rauere Oberfläche. Zur besseren Kühlung und Wasser-Verdrängung ist die Scheibe gelocht. Die Form der innen liegenden Kühlkanäle entspricht denen der Grauguss-Bremse

Bremsscheibe DaimlerChrysler AG

Material SGL BRAKES GmbH

Quelle: Auto, Motor und Sport - Aug. 2000

Die Vorteile ergeben sich durch den Einsatz von Reibschichten und Oxidationsschutz in der Carbon-Keramik-Bremsscheibe.

- Die Scheiben verändern ihre Oberflächenrauigkeit nicht mehr
- Der Reibwert bleibt über die Lebensdauer stabil
- Der Reibelagverschleiß bleibt über die Lebensdauer stabil
- Die Oxidation der nicht geschützten Reibflächen wird verringert
- Die Reibschicht dient als Fahrerindikator. Die Oberfläche verändert sich ab einer bestimmten Laufzeit derart, daß der Fahrer und die Werkstatt eine Veränderung des Bremsverhaltens spüren bzw. sehen können

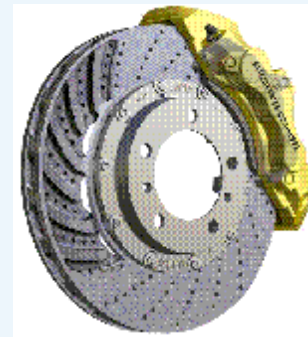
Die Carbon-Keramik-Bremsscheibe erhöht die Performance in Sicherheit und Fahrdynamik.

"Sport-Segment"

- **Kerninhalte:**
Sicherheit + Performance

- **Motivation**
„Ich begeben mich in Gefahr, also brauche ich zusätzliche Sicherheit“

- **Untermauernde Inhalte**
 - Lebensdauer
 - Kostenaspekt
 - Aspekt hochwertiges Material



Positionierungs-
ansatz

Grundpositionierung:

- Sicherheit für sportliches Fahren
- Exklusive Sicherheit

"Executive-Segment"

- **Kerninhalte:**
Sicherheit + Luxus

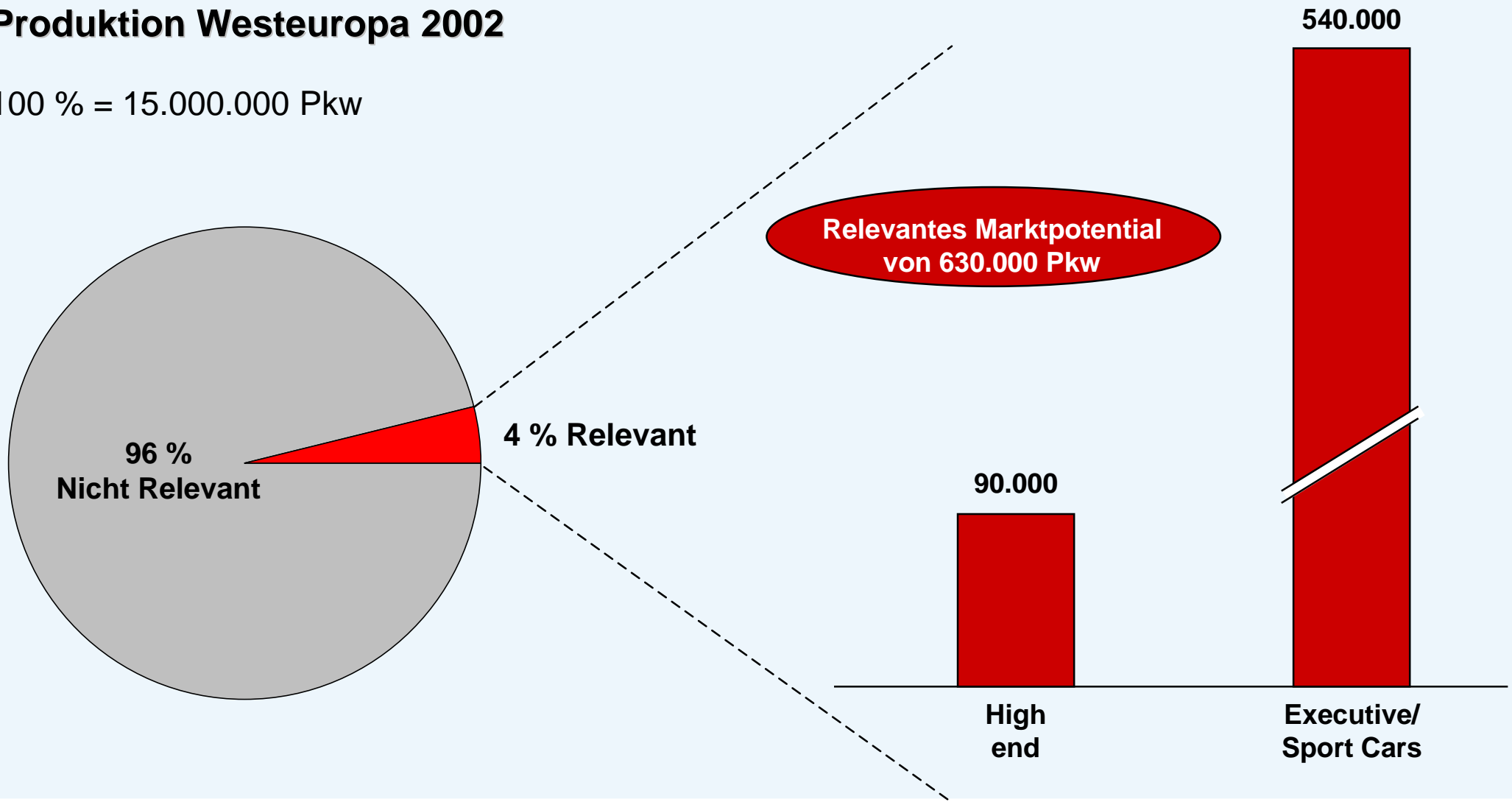
- **Motivation**
„Mein Fahrzeug ist zwar schon sehr sicher, aber für Sicherheit ist mir nichts zu teuer: ich will das beste!“

- **Untermauernde Inhalte**
 - Lebensdauer
 - Innovative Technik

Aufgrund der westeuropäischen Automobilproduktion von 15 Millionen Pkw pro Jahr ergibt sich ein relevantes Marktpotential von ca. 600.000 Fahrzeugen für die Carbon-Keramik-Bremsscheibe.

Produktion Westeuropa 2002

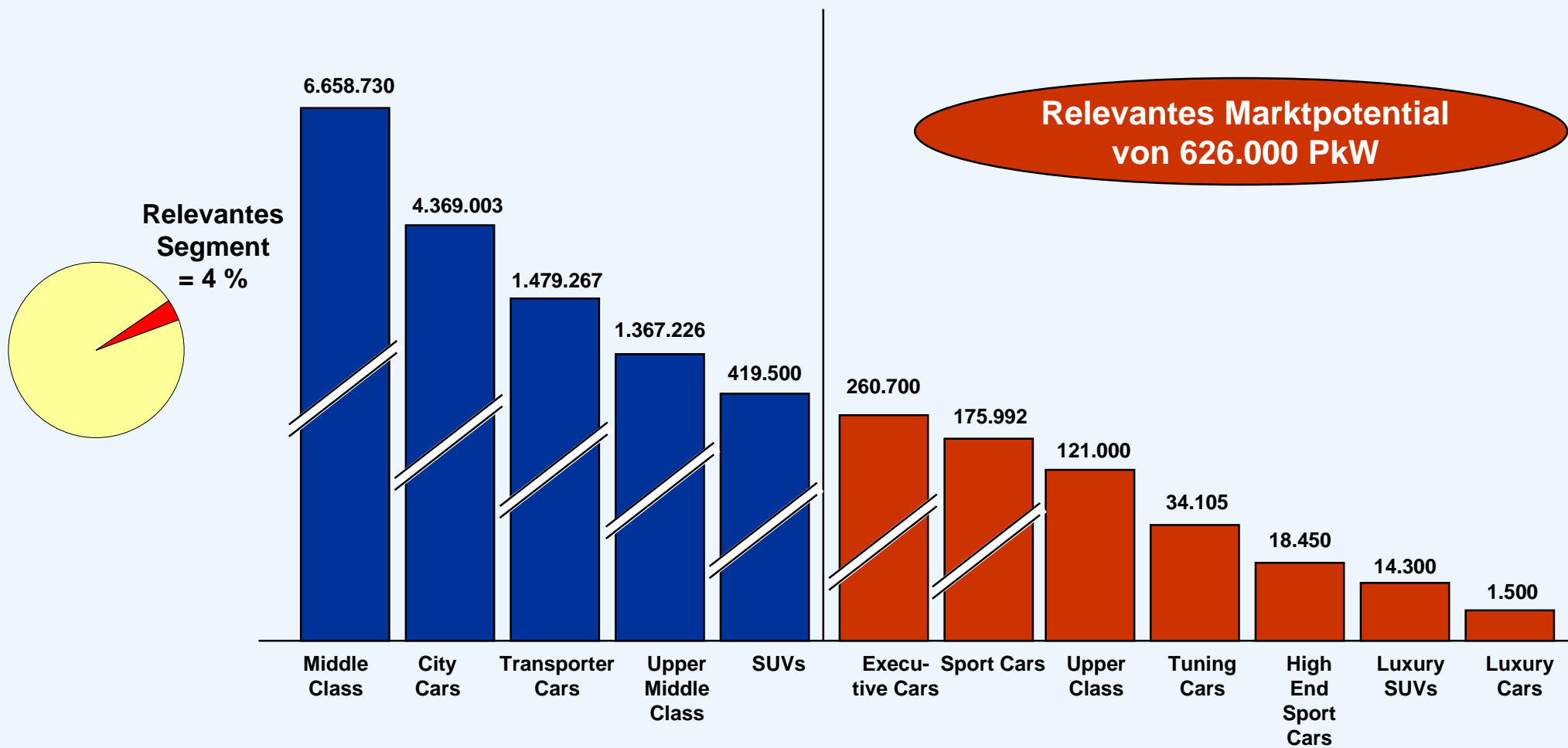
100 % = 15.000.000 Pkw



Geschäftsmodelle - Marktpotential und Marktpenetration

Produktion Westeuropa 2002

100 % = 15.000.000 Pkw



Die Marktpenetration der Carbon-Keramik-Bremsscheibe erfolgt über die Topsegmente der Premium Automobilhersteller.

- Luxus Fahrzeuge: (Maybach, Bentley, Rolls Royce)
- Luxus Sports Utility Vehicles: (Porsche Cayenne, BMW X5 4.6 is, Mercedes ML 55 AMG)
- High End Sportfahrzeuge: (Porsche 911 GT2 und Carrera GT, Ferrari F60)
- Tuning Fahrzeuge: (BMW M6 und M5, Mercedes AMG, Alpina, Audi RS6, S8, S6, S4)

INHALT

- Steigende Anforderungen an Hochleistungsbremssysteme
 - Faserverstärkte Keramik als Antwort
 - Serieneinsatz von faserverstärkten Keramikbremsscheiben
-
- Anhang

Die SGL CARBON Group ist seit Ende der 60er Jahre auf dem Gebiet der Verbundkeramiken erfolgreich und hat dieses Wissen branchenspezifisch für die Automobilindustrie in der SGL BRAKES GmbH konzentriert.

- 1968** Erste Pilotanlage in Deutschland für die Herstellung von Carbonfasern
- 1972** Beginn der Entwicklung von Carbonfaser-Verbundwerkstoffen
- 1975** Erste Realisierung von Carbon-Verbundwerkstoffen für die Raumfahrt
- 1987** Fertigung von Schubablenkern für das Experimentalflugzeug X 31 aus Carbonfaser-Verbundmaterial
- 1993** Fertigung von Trägern für Satellitenspiegel aus Carbon-Keramik
- 1994** Beteiligung am BMFT-Forschungsprojekt für Eisenbahn-Bremsscheiben
- 1997** Fortführung der Entwicklung mit Knorr Bremse mit großtechnischer Ausrichtung zur Herstellung von Carbon-Keramik-Bremsscheiben für Hochgeschwindigkeitszüge
- 1997** Start der Carbon-Keramik-Bremsscheibenentwicklung für die Porsche AG
- 2000** Erfolgreiche Erprobung der Carbon-Keramik-Bremsscheibe im Porsche 911 Turbo
- 2001** Gründung der SGL TECHNOLOGIES GmbH
- 2001** Serieneinsatz der Carbon-Keramik-Bremsscheibe beim Porsche
- 2001** Errichtung einer Fabrik zur industriellen Fertigung der Carbon-Keramik-Bremsscheibe
- 2002** Gründung der SGL BRAKES GmbH

C/SiC-Werkstoffe können in einer Vielzahl von Anwendungsgebieten eingesetzt werden.



Bremsscheiben

- Hochgeschwindigkeitszüge
- Pkw
- LKw
- Maschinenbremsen

Ballistischer Schutz

Fahrzeuge

- Militär
- Polizei
- Politik
- Diplomaten
- Sicherheitstransporter

Schutzwesten

- Zivil
- Militär



Engineered Products

- Heizelemente
- Roste (Ölbadhärtung)
- Chargierplatten
- Trägergestelle
- Spiegelträgerplatten

Neben den Fahrzeugbremsen wird derzeit die Anwendung von C/SiC Bremsscheiben für Hochgeschwindigkeitszüge entwickelt.

Bremsscheiben für Hochgeschwindigkeitszüge



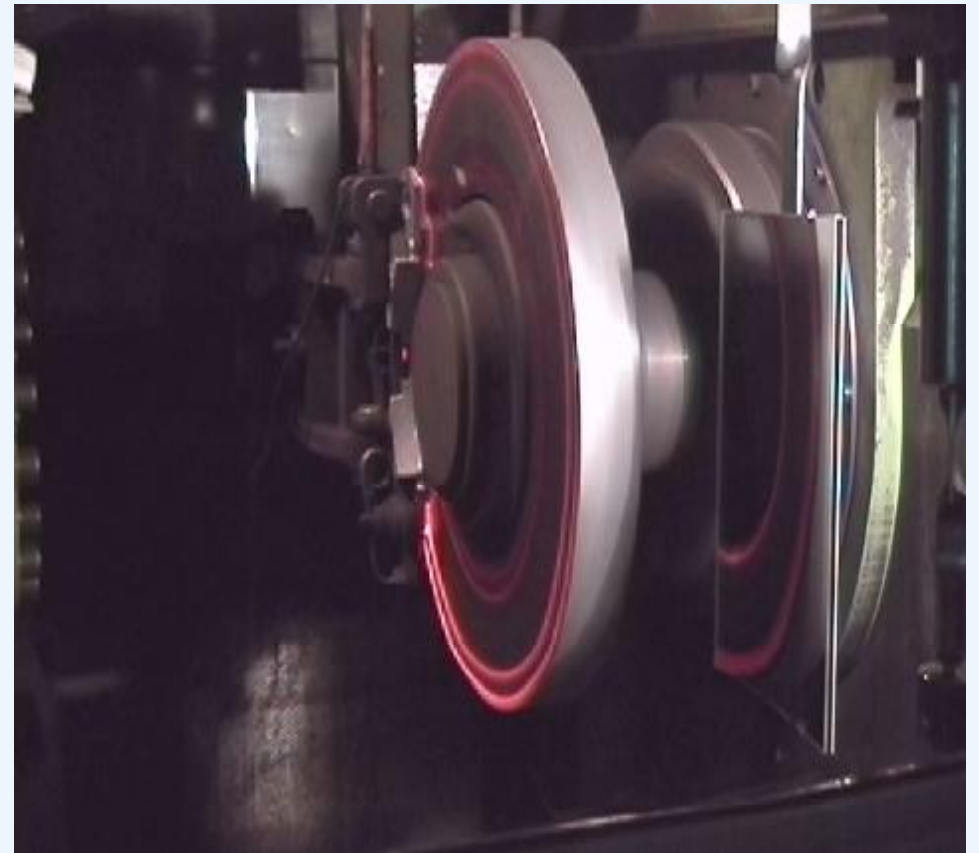
- Gemeinsame Entwicklung von Bahnbremsscheiben für Deutsche Bahn und SNCF mit dem Bremssystemhersteller Knorr und SAB WABCO.
- Der geringe Verschleiß und die niedrige Dichte von C/SiC ermöglichen die Konstruktion eines Bremssystems mit drastischen Gewichtsersparungen (über 5 t in einem ICE2), längerer Lebensdauer, weniger Wartung und höherem Komfort für die nächste Generation wie dem ICE3, TGV und Shinkansen.
- Typische Abmessungen sind $\varnothing 640 \times 64$ mm.
- Bei einer Vollbremsung aus 330 km/h werden bis zu 50 MJ Wärmeenergie je Bremsscheibe absorbiert.
- In Verbindung mit speziellen organischen oder Sinter-Belägen soll eine Lebensdauer von 10 Jahren erzielt werden.

Die Herstellung von großformatigen Zugbremsscheiben (\varnothing 640 x 80 mm) mit einer Masse von 35 kg stellt große Anforderungen an die Formgebung und Silizierung.

Innenbelüftete ICE1 Achs-Bremsscheibe



Vollscheiben für ICE1 im Dynamometer Test



Ansprechpartner:

SGL BRAKES GmbH

Werner-von-Siemens-Straße 18

86405 Meitingen

Telefon: 08271/83 16 61

Fax: 08271/83 24 93

Web: www.sglbrakes.de