

5.3 Metall Matrix Composites (MMCs)

- Dr. Ilka Lenke
CeramTec AG
Plochingen

Die Folien finden Sie ab Seite 421.

5.3.1. Einleitung

Das Einsatzspektrum für Leichtmetall-Komponenten erweitert sich stetig^{1,2}. Insbesondere im Automobilbau, aber auch in vielen anderen Bereichen sind Leichtbauteile - vor allem aus Aluminium, aber auch aus Magnesium oder Titan - inzwischen Standard.

Allerdings stößt der Leichtbau dort an seine Grenzen, wo er hohen tribologischen, mechanischen oder thermischen Belastungen standhalten muss.

Die Lösung liegt in der Verstärkung von Leichtmetallbauteilen am besten genau nur an den Stellen, die am stärksten beansprucht werden. Es kommen Metal-Matrix Composites zum Einsatz, die die positiven Eigenschaften der Metalle und der Keramik (siehe Folie Werkstoffstärken) vereinen und die negativen Eigenschaften möglichst überdecken. So lassen sich Werkstoffe für bestimmte Anforderungen maßschneidern.

5.3.2. Metal-Matrix-Composites

Mit Metal-Matrix Composites (MMCs) werden Verbundwerkstoffe bezeichnet, deren Gefüge aus einer metallischen Legierung und einer gezielt eingebrachten Verstärkungskomponente besteht.

MMC = Metall + Verstärkung

Verstärkt werden können die metallischen Legierungen mit

- Partikeln bzw. Hartstoffen (z.B. Silizium, Siliziumcarbid, Aluminiumoxid, ...)
- Langfasern (z.B. Aluminiumoxid, Siliziumoxid, ...)
- Kurzfasern (z.B. Aluminiumoxid, Siliziumoxid, Kohlenstofffasern, ...)
- Whiskern* (z.B. Aluminiumoxid, Siliziumcarbid, ...)
- Mischungen aus Partikeln und Fasern (Hybridverstärkung)

Als metallische Komponenten werden am häufigsten Aluminiumlegierungen eingesetzt. Verstärkungen kommen aber auch zur Verbesserung der Werkstoffeigenschaften von Magnesium und Kupfer³ zum Tragen.

5.3.3. Herstellung von MMC-Bauteilen

Bauteile aus MMC-Werkstoffen können unter anderem über einen Gießprozess hergestellt werden oder aber durch Infiltrieren von porösen Vorkörpern (Preforms) entstehen. Man spricht je nachdem von

- gegossenen Metal-Matrix Composites oder
- infiltrierten Metal-Matrix Composites

Zur Herstellung gegossener Metal-Matrix Composites werden in flüssige Legierungen Partikel oder Whisker eingerührt. Dies ist bis zu einem Volumenanteil von 20 bis maximal 30 Volumenprozent möglich. Anschließend wird die mit Partikeln versetzte Schmelze vergossen, und das entstehende Bauteil enthält über den ganzen Querschnitt die Verstärkungskomponente.

Der für die keramische Industrie interessante Prozess jedoch ist die Herstellung von Metal-Matrix Composites über Infiltrationsverfahren (siehe Folie Herstellverfahren).

Über speziell entwickelte Prozesse oder über konventionelle Verfahren der keramischen Formgebung - axiales Pressen, isostatisches Pres-

* Whisker: (engl. Barthaar) sehr dünne Kristallfaser bzw. nadelartiger Kristall mit hoher Zugfestigkeit

sen, Extrudieren - werden poröse Vorkörper hergestellt. Die offene Porosität wird auf Werte zwischen 25 und 75 Volumenprozent gezielt eingestellt⁴. Anschließend werden die Vorkörper auf über 500°C erwärmt und dem Infiltrationsprozess zugeführt. Die metallische Schmelze durchdringt dabei das poröse keramische Netzwerk, erstarrt und bildet mit der Verstärkungskomponente zusammen ein Durchdringungsgefüge. Zur Anwendung kommen unterschiedliche Verfahren, wie zum Beispiel die Druckgussinfiltration, die Gasdruckinfiltration oder die drucklose Infiltration. Bei diesen Verfahren ist es möglich, Bauteile herzustellen, die nur partiell Verstärkungskomponenten enthalten - genau an den Stelle, wo verbesserte Werkstoffeigenschaften gefordert sind.

5.3.4. Anwendungstechnisches Gefügedesign

Die MMC-Werkstoffe werden in der Regel ganz speziell für eine entsprechende Anwendung maßgeschneidert. Dies erfordert, dass die porösen keramischen Vorkörper bezüglich ihrer Zusammensetzung und Porosität stets an die Erfordernisse des Infiltrationsverfahrens und des Verbundwerkstoffes angepasst werden.

Ziele des anwendungstechnischen Gefügedesigns sind zum Beispiel:

- Steigerung der mechanischen Festigkeit
- Beeinflussung von Reibung und Verschleiß (der Tribologie)
- Beeinflussung der thermischen Dehnung
- Verbesserung der thermischen Stabilität
- Beibehalten der Gewichtsreduzierung durch Leichtbau bzw. Erhalt der geringen Dichte
- gute Verarbeitbarkeit und Bearbeitbarkeit
- möglichst niedrige Herstellkosten

Die Folie „Gefügedesign“ zeigt Beispiele für solch unterschiedliche Designmöglichkeiten. Variiert wurden die Partikelart beziehungsweise Partikelkombinationen, der Volumenanteil der Partikel sowie die Partikelgrößen. Neben Partikeln können auch Fasern - insbesondere zur Steigerung der Werkstoffzähigkeit - eingelagert werden.

Dabei weisen die Partikelverstärkungen, wie schematisch in der Folie „Typische Verstärkungen und Kosten“ dargestellt, einen wirtschaftlichen Vorteil gegenüber Faserverstärkungen auf⁵. Eine extreme Verbesserung der Werkstoffeigenschaften hingegen (zumindest in eine Raumrichtung) wird insbesondere durch die Einlagerung von Langfasern erreicht.

Auf der Folie „Steigerung der Verbundfestigkeit“ ist exemplarisch dargestellt, wie die Zugfestigkeit der Aluminiumlegierung 226 durch die Zugabe von Partikeln beeinflusst wird. Die Matrix Al 226 erreicht unverstärkt Werte von über 260 MPa. Werden 25 Volumenprozent Siliziumpartikel dazugegeben, um die tribologischen Eigenschaften (Reibung und Verschleiß) der Legierung zu verbessern, werden Festigkeitswerte von 160 MPa erreicht, was für die spezielle Anwendung Zylinderlauffläche völlig ausreichen ist. Substituiert man einen Teil der Siliziumpartikel durch Aluminiumoxidpartikel, kann die Zugfestigkeit wieder auf über 200 MPa gesteigert werden, die tribologischen Eigenschaften ändern sich dadurch jedoch auch. Enthält die Aluminiumlegierung hingegen nur Aluminiumoxidpartikel, steigen die Werte auf über 260 MPa an. Die Graphik zeigt auch, dass die Korngröße die Festigkeit beeinflusst. Je feiner das Korn ist, desto höher sind die Werte.

Ein weiteres Beispiel für das Werkstoffdesign zeigt die Folie „Thermische Dehnung“. Aluminiumlegierung weisen thermische Dehnungen von über $20 \times 10^{-6}/K$ auf. Für bestimmte Anwendungen ist es interessant, diesen Wert zu senken und an Werte von Grauguss oder Stahl (ca. $12 \times 10^{-6}/K$ auf) anzupassen, wobei aber die geringe spezifische Dichte von $< 3 \text{ g/cm}^3$ des Werkstoffes soweit wie möglich erhalten bleiben soll. Dies kann erreicht werden, indem das Metall (ME) mit keramischen Komponenten (K) kombiniert wird, die niedrige Wärmedehnungen (WAK) aufweisen. Mit der linearen Mischungsregel ist die Wärmedehnung des Verbundwerkstoffes (VB) abschätzbar:

$$\text{WAK(VB)} = \text{WAK(Me)} \times \text{Vol.-(\%)(Me)} + \text{WAK(K)} \times \text{Vol.-(\%)(K)}$$

Allgemein gilt, je höher der Anteil der keramischen Komponente, desto niedriger ist die Wärmedehnung des Verbundwerkstoffes.

5.3.5. Anwendungsbeispiele

Im Aluminium-Motorblock des Porsche Boxster - seit 1996 auf dem Markt - sorgen an Stelle herkömmlicher Grauguss-Büchsen Zylinderlaufflächen aus einem Aluminium-Silizium-Verbund für verbesserte Anwendungseigenschaften wie z.B. weitere Massereduzierung, geringeren Ölverbrauch und niedrigere HC-Emission^{6 7}. In enger Zusammenarbeit mit der Kolbenschmidt Aluminium-Technologie AG in Neckarsulm, der das Produkt unter dem Markennamen Lokasil II ® führt, entwickelte CeramTec eine hochporöse Preform, deren Eigenschaften im Verbund speziell an die tribologischen Anforderungen von Zylinderlaufflächen angepasst sind. Sie besteht nur zu etwa 25 Volumenprozent aus Silizium-Partikeln und bildet zusammen mit der Aluminium-Matrix im Motorblock eine äußerst abriebfeste Lauffläche, die nahtlos mit dem übrigen Motorblock verbunden ist. Diese monolithische Integration der lokal verstärkten Bereiche in das Gesamtbauteil erlaubt kompaktere Bauweisen, da die Stege zwischen den Zylindern auf weniger als 5 Millimeter reduziert werden können.

Eine weitere Serienanwendung von porösen Preforms ist die lokale Verstärkung des Muldenrandes bei Motorkolben. Durch die Einlagerung von Fasern verbessert sich das Ermüdungsverhalten sowie die Festigkeitswerte bei hohen Temperaturen⁸. Insgesamt konnte für diese Anwendung durch das lokale Werkstoffdesign eine Verbrennungsoptimierung und somit Reduzierung der Emissionswerte erreicht werden.

Auch an anderer Stelle im Automobil könnten die Leichtgewichte aus MMC schon bald herkömmliche Werkstoffe ablösen. Denkbar sind Keramik-Verstärkungen an Komponenten wie Bremsbelagträgerplatten (Gewicht), Lager (Wärmedehnung), oder Pleuelstangen (Gewicht).

Aus gegossenen MMC wurden zum Beispiel Bremsscheiben für Motorräder oder die Bahn hergestellt und getestet.

Für die Elektroindustrie interessant sind MMC aus Siliziumcarbid und Aluminium⁹. Sie dienen dort zur Wärmeableitung und weisen gegenüber anderen Lösungen mit hoher Wärmeleitfähigkeit einen an das Aluminiumoxid- oder Aluminiumnitrid-Substrat angepassten Wärmeausdehnungskoeffizienten auf. Sie werden in der Raumfahrt, der Flugzeugindustrie, im Motorenbau und bei der Bahnindustrie angewandt.

Weitere Anwendungsmöglichkeiten von faser- oder partikelverstärktem Aluminium sind Sportartikel wie der Schlagkopf des Golfschlägers, Tennisschläger oder Fahrradrahmen für Mountainbikes.

Literatur:

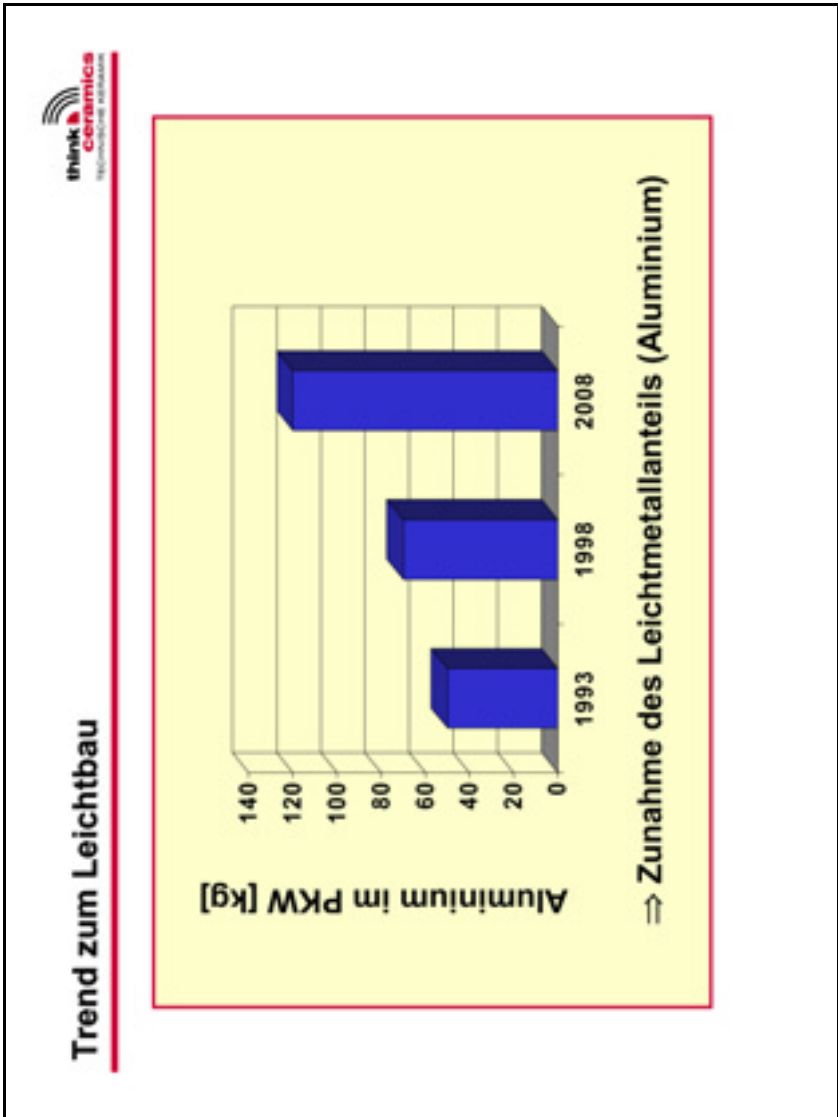
1. F. Venir, Leichtbau stimuliert den Absatz. ATZ/MTZ-Sonderausgabe: Werkstoffe im Automobilbau (1998/1999) 54-56.
2. D. Brungs, H. Fuchs, Leichtmetall im Automobilbau – Trends und zukünftige Anwendungen. ATZ/MTZ-Sonderausgabe: Werkstoffe im Automobilbau (1998/1999) 50-53.
3. M.Türpe: Betrachtung zu Verbundwerkstoffen mit Kupfermatrix. Metall 53 (4/1999) 211-212.
4. H. Stuhler: Starke Leichtgewichte, Von der Luft in der Keramik zum High-Tech-Werkstoff; in Technische Keramik in der Praxis – Seminarreihe 2001. Verband der Keramischen Industrie, Fahner Druck GmbH, Lauf (2001) 175 – 207.
5. K. U. Kainer: Partikel, Fasern und Kurzfasern zur Verstärkung von metallischen Werkstoffen; in K. U. Kainer (Hrsg.): Metallische Verbundwerkstoffe. DGM Informationsgesellschaft GmbH, Oberursel (1994) 43 – 64.
6. I. Lenke, G. Richter, R. Rogowski: Ceramic Engineering with Preforms for Locally Reinforced Light Metal Components; in: J. Heinrich, F. Aldinger Ceramic (Hrsg.) Materials and Components for Engines. Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim (2001) 383-386.
7. E. Köhler, I. Lenke, J. Niehues, Lokasil® - eine bewährte Technologie für Hochleistungsmotoren – im Vergleich zu anderen Konzepten; in VDI-Bericht 1612 Zylinderlauffläche, Hochleistungskolben, Pleuel. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf (2001) 35-54.
8. S. Mielke, Chr, Rothe, W. Henning: Faserverstärkte Kolben; in VDI-Bericht 1612 Zylinderlauffläche, Hochleistungskolben, Pleuel. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf
9. www.electrovac.com (Stand Januar 2002)

Die verwendeten Vortragsfolien (Nr. 1 bis 14) finden sich auf den folgenden Seiten.

Mechanik und Elektronik

**Metal-Matrix Composites
(MMCs)**

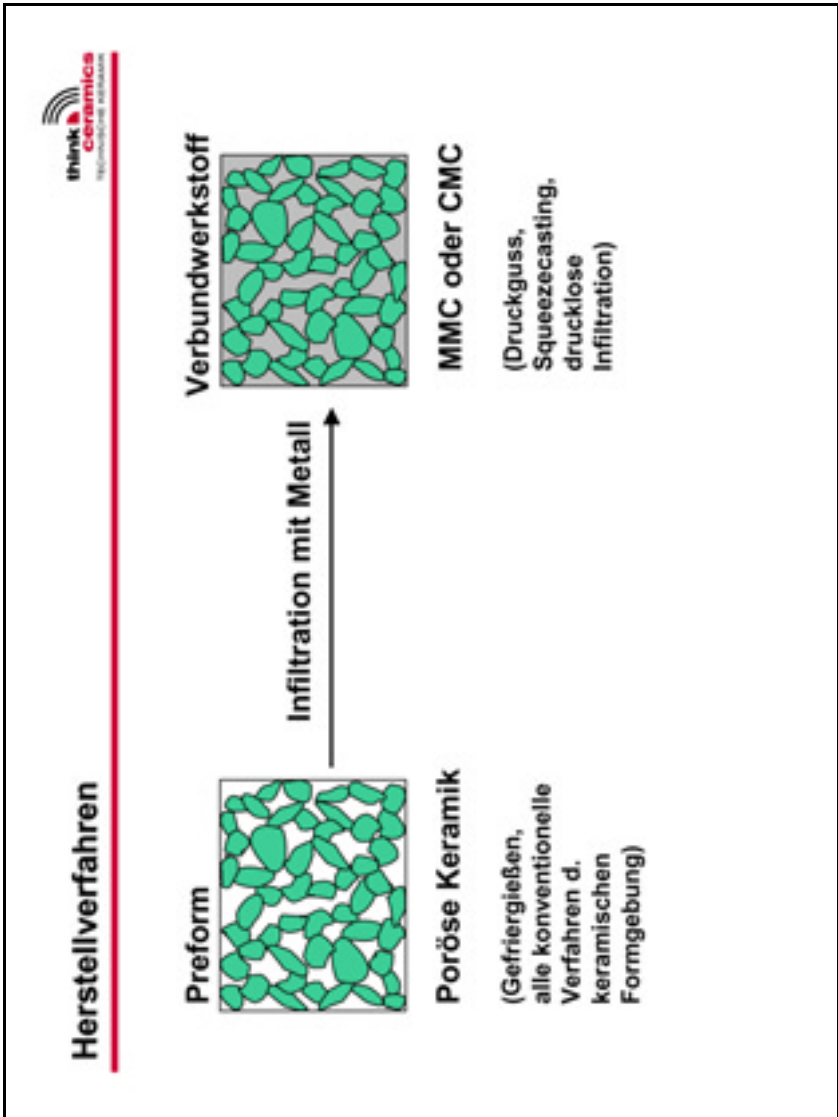
Dr. Ilka Lenke
CeramTec AG
Plochingen



Folie 2

Werkstoffstärken

	Keramik	Metall
• Härte		
• Hochtemperaturfestigkeit		
• Thermische Ausdehnung		
• Duktilität		
• Korrosionsbeständigkeit		
• Verschleißfestigkeit		
• elektrische Leitfähigkeit		
• Dichte		
• Wärmeausdehnung		

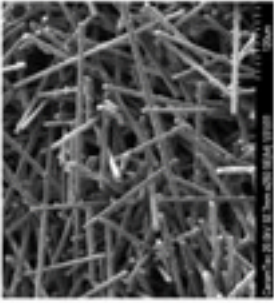
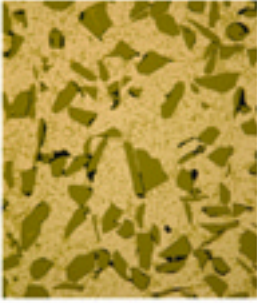





Folie 4

Das Konzept

- Schwächen von Leichtmetallen kompensieren
 - durch keramische Partikel oder Fasern
- lokale Verstärkung (Gradientenwerkstoffe)
- anwendungstechnisches Gefügedesign
 - mechanische Festigkeit
 - thermische Dehnung
 - Reibung und Verschleiß
 - Gewichtsreduzierung
- **Erhalt des geringen spezifischen Gewichts bei verbesserten Werkstoffeigenschaften!**

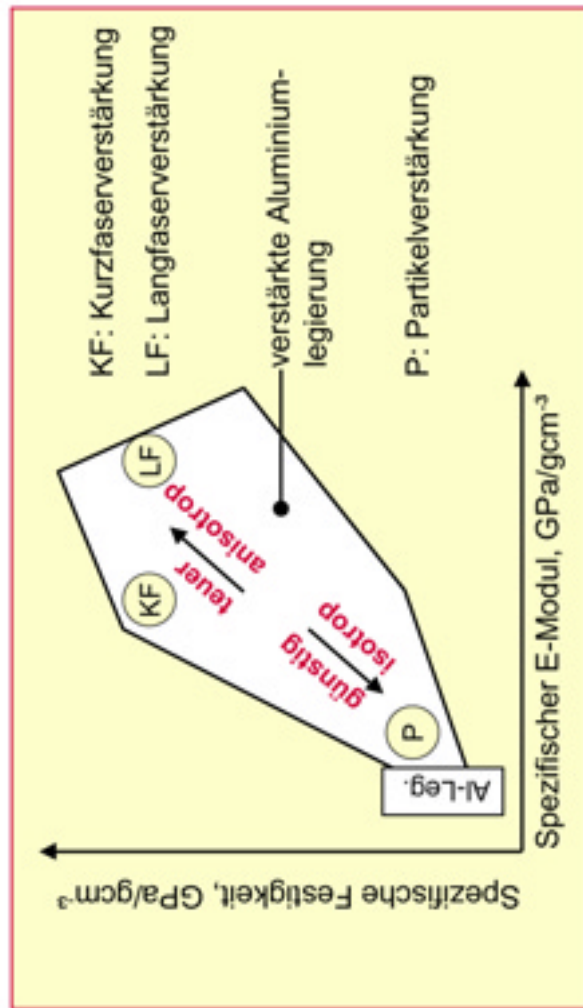
Gefügedesign



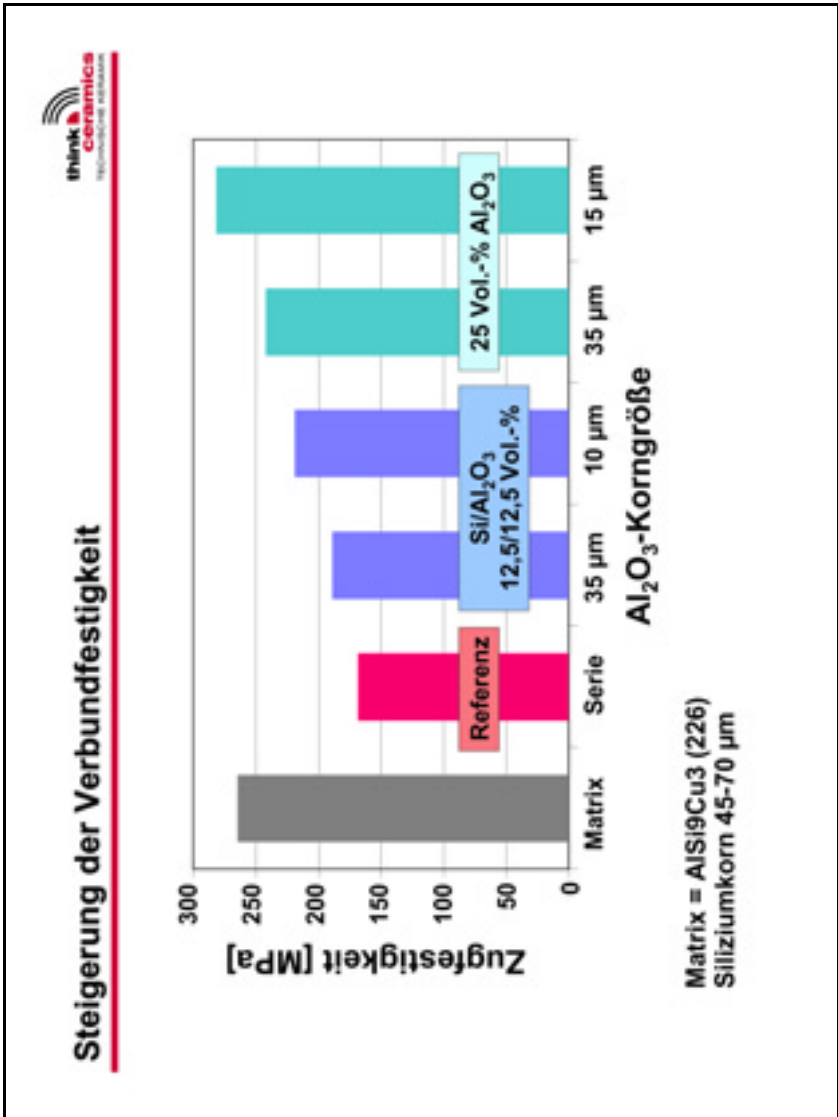
- Hartstoffkombination
- Korngrößenverteilung
- Volumenanteil

Folie 6

Typische Verstärkungen und Kosten

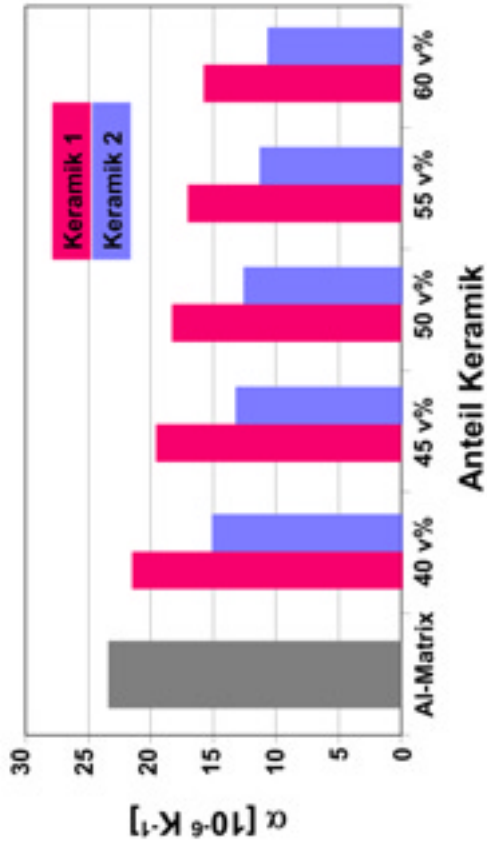


Isotrop: in alle Raumrichtungen gleiche Eigenschaften
Anisotrop: nicht in alle Raumrichtungen gleich Eigenschaften



Folie 8

Thermischen Dehnung

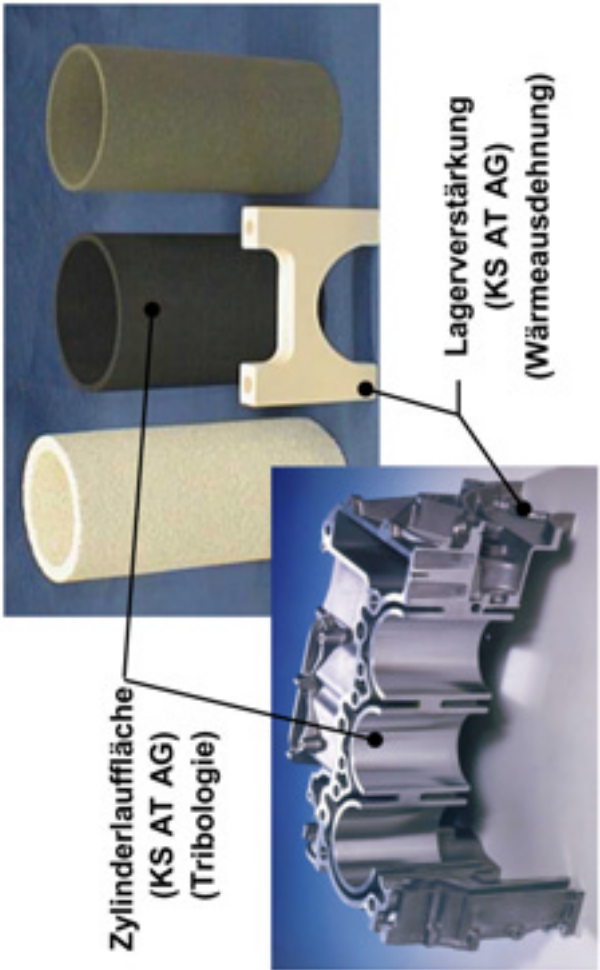


**think
ceramics**
TECHNISCHE CERAMIK

Produkt-Beispiele

**Zylinderlauffläche
(KS AT AG)
(Tribologie)**

**Lagerverstärkung
(KS AT AG)
(Wärmeausdehnung)**

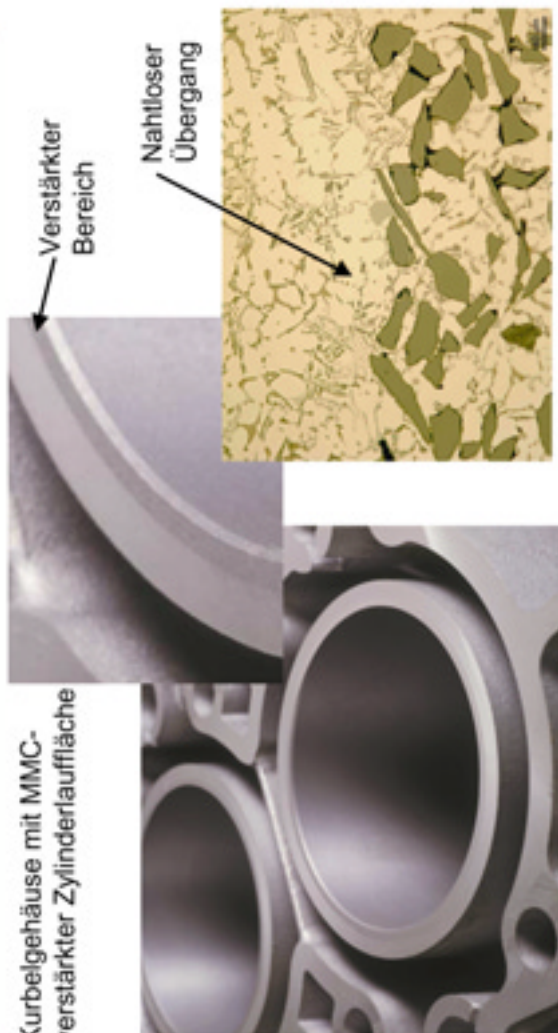


The image displays three ceramic cylinders of varying colors (light green, dark grey, and light green) and a cross-section of a metal component with ceramic inserts. The cylinders are shown against a dark blue background. The cross-section shows a metal housing with several ceramic inserts (light green) embedded in it. The text labels point to the cylinder surfaces and the ceramic inserts in the metal housing.

Folie 10

Produkt-Beispiele

Kurbelgehäuse mit MMC-
verstärkter Zylinderlauffläche





Folie 12

Produktbeispiele



Kühlplatten für die
Elektronik (AlSiC)



www.electrowac.com

Sportgeräte

1

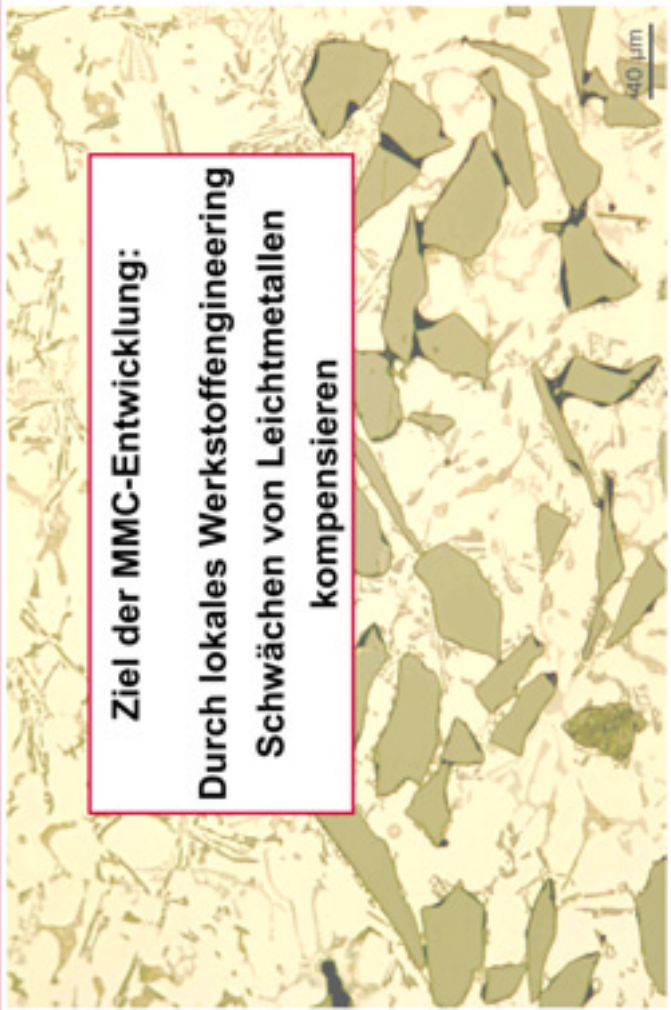


14 grams have been moved from the hosel to the back low toe and sole to expand the sweet spot toward the toe.

Zusammenfassung

**think
ceramics**
TECHNOLOGISCHE UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

**Ziel der MMC-Entwicklung:
Durch lokales Werkstoffengineering
Schwächen von Leichtmetallen
kompensieren**



40 μm