

3.3 Metall-Keramik-Verbundwerkstoffe für tribologische Anwendung

- Elke Vitzthum
CeramTec AG
Lauf a. d. Pegnitz

Dr. Ilka Lenke
CeramTec AG
Plochingen

Die Folien finden Sie ab Seite 314.

3.3.1. 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. Die Motivation für den Einsatz von Leichtmetallen besteht in der Gewichtsreduzierung, der Senkung des Treibstoff- bzw. Energieverbrauchs, Reduzierung der Schadstoffemission, des Verbesserns des Fahrkomforts, Erhöhung der Lebensdauer und Sicherheit. Allerdings stößt der Leichtbau dort an seine Grenzen, wo er hohen tribologischen, mechanischen oder thermischen Belastungen standhalten muss.

Das heißt, der Kundennutzen für den Einsatz von Metall-Keramik Verbundwerkstoffen liegt in der Kompensation der Schwächen des Leichtmetalls durch z.B. keramische Partikel oder Faserverstärkung unter Erhaltung des geringen Gewichts mit verbesserten Werkstoffeigenschaften. Die Lösung liegt somit in der Verstärkung von Leichtmetallbauteilen am besten genau nur an den Stellen, die am stärksten beansprucht werden. Metall-Keramik Verbundwerkstoff vereinen die positiven Eigenschaften der Metalle und der Keramik vereinen und überdecken die negativen Eigenschaften.

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.

Die Eigenschaften der metallischen Verbundwerkstoffe sind auch abhängig von der Verteilung, Orientierung und Art der Verstärkungskomponenten. Im Bild 1 sind die Variationsmöglichkeiten der spezifischen Festigkeit und des spezifischen E-Moduls von Aluminium-Matrix Verbundwerkstoffen für unterschiedliche Verstärkungen dargestellt. Beim Einsatz diskontinuierlicher Verstärkung werden die mechanischen Eigenschaften bis auf den E-Modul nur gering verbessert - Vorteil liegt hier in den niedrigen Herstellkosten. Bei Einsatz von Monofilamentfasern oder Kohlenstofffasern kann man hohe spezifische Festigkeiten erzielen, jedoch erhält man anisotrope Eigenschaften und die Herstellkosten liegen höher. Dabei weisen die Partikelverstärkungen, wie schematisch in der Folie „Typische Verstärkungen und Kosten“ dargestellt, einen wirtschaftlichen Vorteil gegenüber Faserverstärkungen auf⁴. Eine extreme Verbesserung der Werkstoffeigenschaften hingegen (zumindest in eine Raumrichtung) wird insbesondere durch die Einlagerung von Langfasern erreicht.

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

Einleitung: Typische Verstärkungen und Kosten

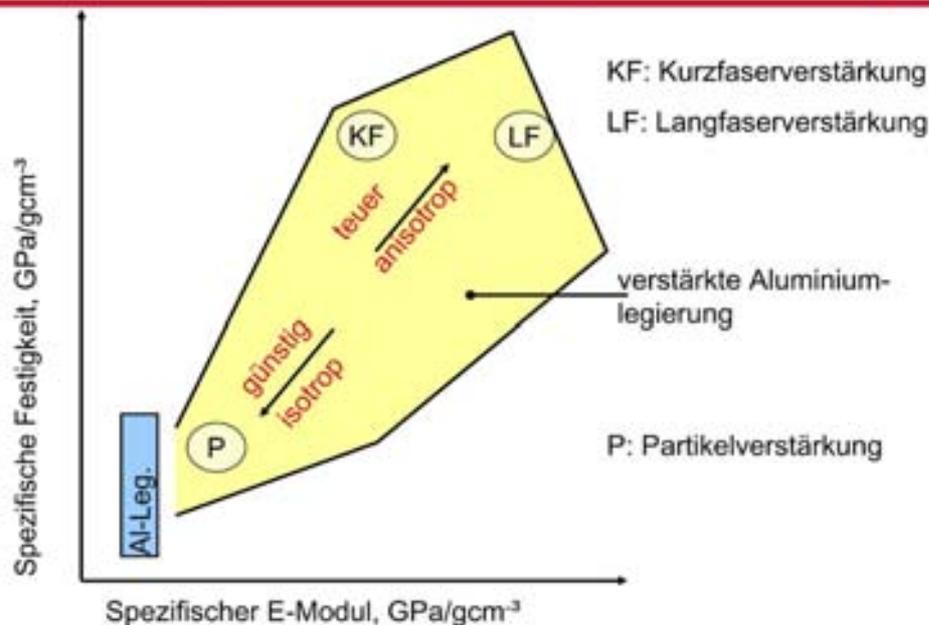


Bild 1: Typische Verstärkungen und Kosten

3.3.2. Herstellung

Bauteile können unter anderem über einen Gießprozess hergestellt werden oder aber durch Infiltrieren von porösen Vorkörpern (Preforms) entstehen.

Zur Herstellung gegossener Metall-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 Metall-Matrix Composites über Infiltrationsverfahren (Folie Herstellverfahren).

Über speziell entwickelte Prozesse oder über konventionelle Verfahren der keramischen Formgebung — axiales Pressen, isostatisches Pressen, Extrudieren — werden poröse Vorkörper hergestellt. Die offene Porosität wird auf Werte zwischen 25 und 75 Volumenprozent gezielt eingestellt⁵. 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.

3.3.2. Anwendungstechnisches Gefügedesign

Die Metall-Keramik Verbundwerkstoffe 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 Parti-

kelgrößen. Neben Partikeln können auch Fasern — insbesondere zur Steigerung der Werkstoffzähigkeit — eingelagert werden.

Auf der Folie „Einleitung: Zugfestigkeit“ 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 Zylinderlauf- fläche völlig ausreichen ist. Substituiert man einen Teil der Silizium- partikel durch Aluminiumoxidpartikel, kann die Zugfestigkeit wieder auf über 200 MPa gesteigert werden, die tribologischen Eigen- schaften ändern sich dadurch jedoch auch. Enthält die Aluminium- legierung 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 „Ein- leitung. Wärmeausdehnung“. 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:

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

Allgemein gilt, je höher der Anteil der keramischen Komponente, um- so niedriger ist die Wärmdehnung des Verbundwerkstoffes.

Die Folie „Biegefestigkeit“ zeigt die Abhängigkeiten der Aluminium- korngröße und des Aluminiumoxidgehaltes im Verbundstoff und die

daraus resultierende Biegefestigkeiten. Es wird deutlich, dass die Biegefestigkeit bei kleineren Aluminiumoxid-Korngrößen steigt. Auch bei annähernd gleich bleibendem Aluminiumoxidgehalt ist der Einfluss der Partikelkorngrößenverteilung derart, je geringer die Kornverteilung desto höher ist die Biegefestigkeit.

3.3.3. Beispiele und Anwendungen

3.3.3.1. Beispiel 1 - Motorblock

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 dem Motorenhersteller 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.

3.3.3.2. Beispiel 2 - Gleitpaarung

Bei keramischen Gleitpaarungen wird das tribologische Verhalten insbesondere durch die physikalischen Eigenschaften der eingesetzten Werkstoffe — wie zum Beispiel der Wärmeleitfähigkeit / Wärmekapazität und Wärmedehnung — beeinflusst. Es wird zwischen hart / weich und hart / hart Paarungen unterschieden. Dichtungen, die über längere Zeit ohne Flüssigkeitsschmierung betreiben werden, werden zum Beispiel als hart / weich Paarung in SiC / Kohlegraphit ausgeführt, da Kohlegraphit hervorragende Trockenlauf-

eigenschaften besitzt. So können niedrige Reibungszahlen und ein gutes Gleiten sowie ein möglichst geringer Verschleiß bei diesen Bedingungen gewährleistet werden. Damit die Einflussparameter nahe dem späteren Ist-Zustand entsprechen, wurde ein Gleitringprüfstand errichtet, damit die Dichtung unter Realbedingungen getestet werden kann. Messgrößen sind Drehzahl, Temperatur, Drehmoment zusätzlich kann sowohl im Nass- als auch im Trockenlauf gefahren werden.

Bei den Testläufen der Paarung Kohle/SSIC und Kohle / Metall-Keramik Verbund ergab sich folgendes:

- die Konzepttauglichkeit der Paarung Kohle /Al-SiC wurde nachgewiesen, durch niedrigeres Reibmoment bei Nasslauf, niedrigere Streubreite des Reibmoments, niedrigere Temperaturdifferenz bei hoher Drehzahl als bei der Kombination Kohle/SSIC. Die Trockenlaufeigenschaften sind vergleichbar mit der Paarung Kohle/SSIC
- zusätzlich ist die Herstellung in engen Toleranzen möglich und die Herstellkosten günstiger als beim SSIC

3.3.3.3. Weitere Anwendungen

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 Metall-Keramik-Verbundwerkstoffe schon bald herkömmliche Werkstoffe ablösen. Denkbar sind Keramik-Verstärkungen an Komponenten wie Bremsbelagträgerplatten (Gewicht), Lager (Wärmedehnung), oder Pleuelstangen (Gewicht).

Aus gegossenen Metall-Keramikverbundwerkstoffe wurden zum Beispiel Bremsscheiben für Motorräder oder die Bahn hergestellt und getestet.

Für die Elektroindustrie interessant sind Metall-Keramikverbundwerkstoffe 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 Wärmedehnungskoeffizienten 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.

3.3.4. Literatur

¹ Venir, Leichtbau stimuliert den Absatz. ATZ/MTZ-Sonderausgabe: Werkstoffe im Automobilbau (1998/1999) 54-56.

² 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 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.

⁵ 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.

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 24) finden sich auf den folgenden Seiten.

Metall-Keramik Verbundwerkstoffe für tribologische Anwendungen

Elke Vitzthum
CeramTec AG
Lauf a. d. Pegnitz

Dr. Ilka Lenke
CeramTec AG
Plochingen



Einleitung: Motivation

Motivation für den Einsatz von Leichtmetallen

- Gewichtsreduktion
- Senken des Energie bzw. Treibstoffverbrauchs
- Verbessern des Komfort (Fahrodynamik)
- Erhöhen der Lebensdauer und Sicherheit
- Reduzieren der Schadstoffemission

Grenzen für den Einsatz von Leichtmetallen

- Materialeigenschaften
- geringe Verschleißbeständigkeit
- unzureichendes Reibungsverhalten
- geringe Festigkeit
- geringer E-Modul
- schlechte thermische Eigenschaften

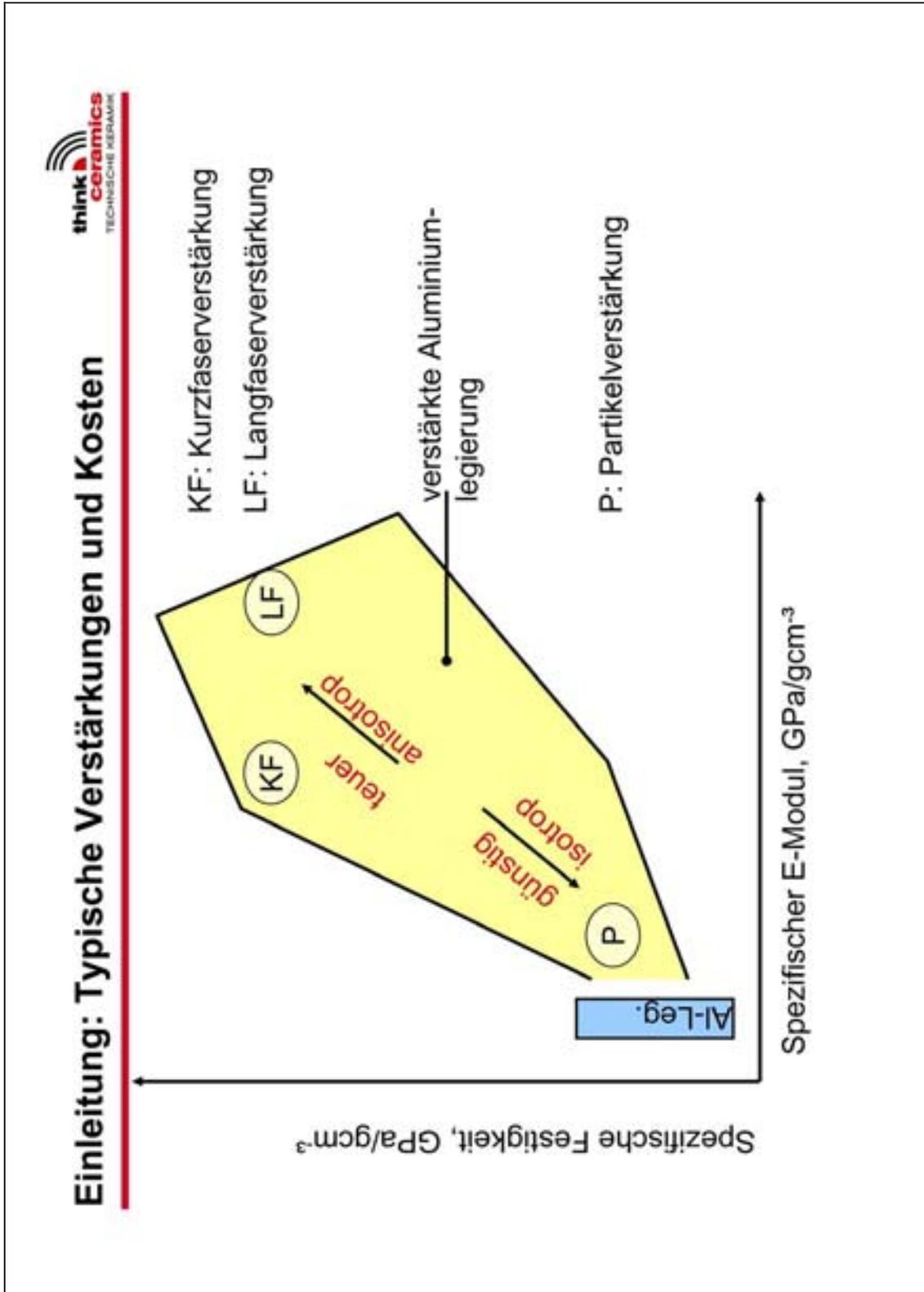
Einleitung: Motivation

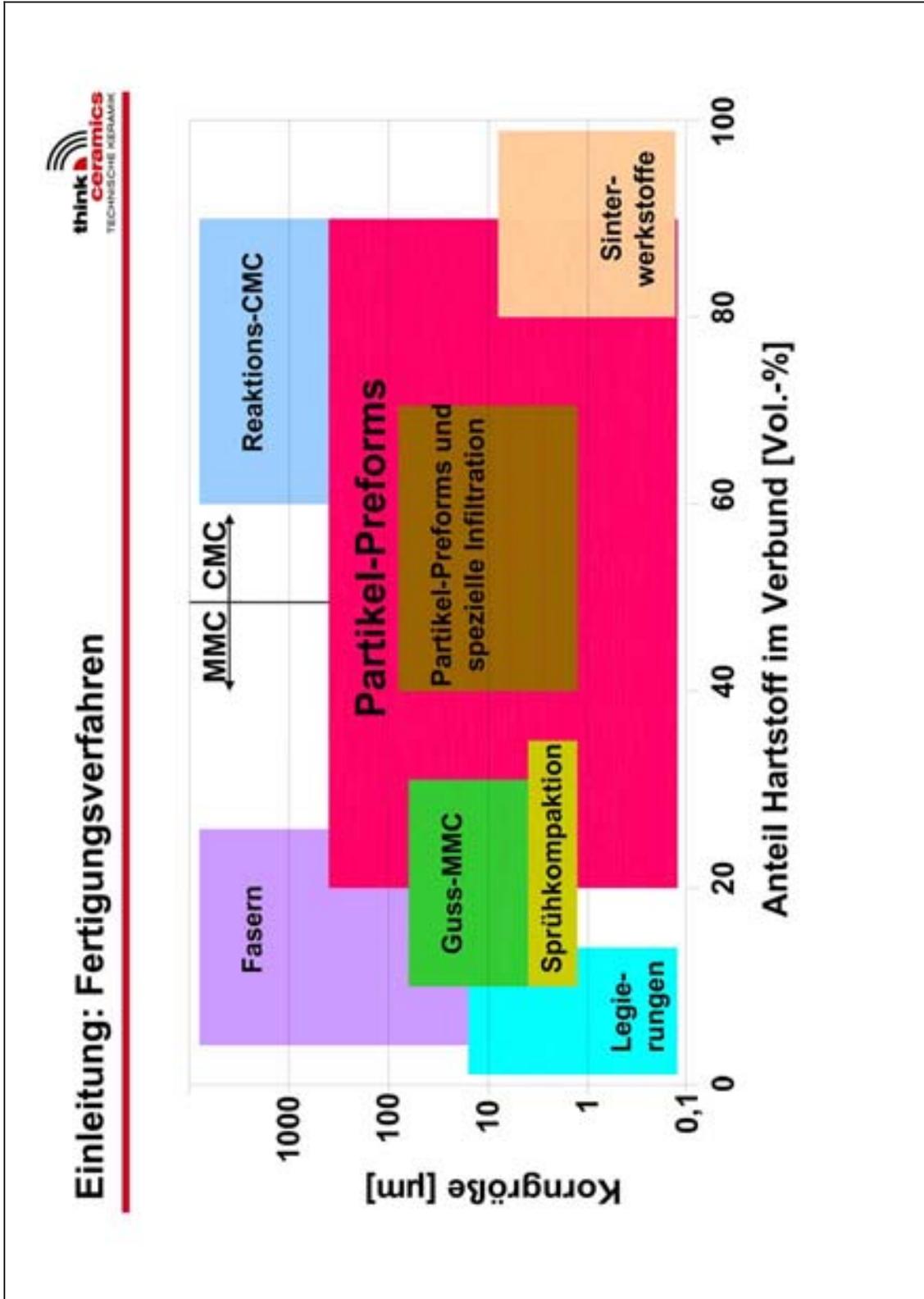


**Kundennutzen bzw. Motivation
für den Einsatz von Metall-Keramik Verbundwerkstoffen**

- **Kompensation von Schwächen des Leichtmetalls (LM)**
 - **durch keramische Partikel- oder**
 - **durch Faserverstärkung**

- **Erhalten des geringen spezifischen Gewichtes bei verbesserten
Werkstoffeigenschaften !**

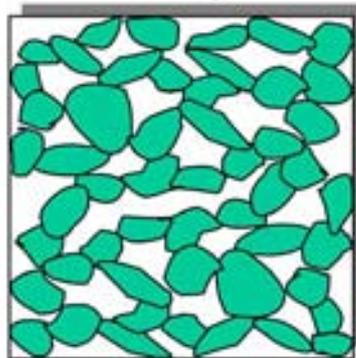




3.3 Metall-Keramik-Verbundwerkstoffe - Folie 5

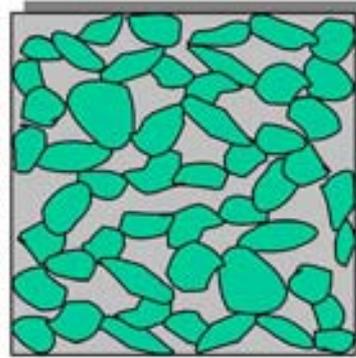
Einleitung: Herstellung

Preform



Infiltration mit Metall

Metall-Keramik
Verbundwerkstoff

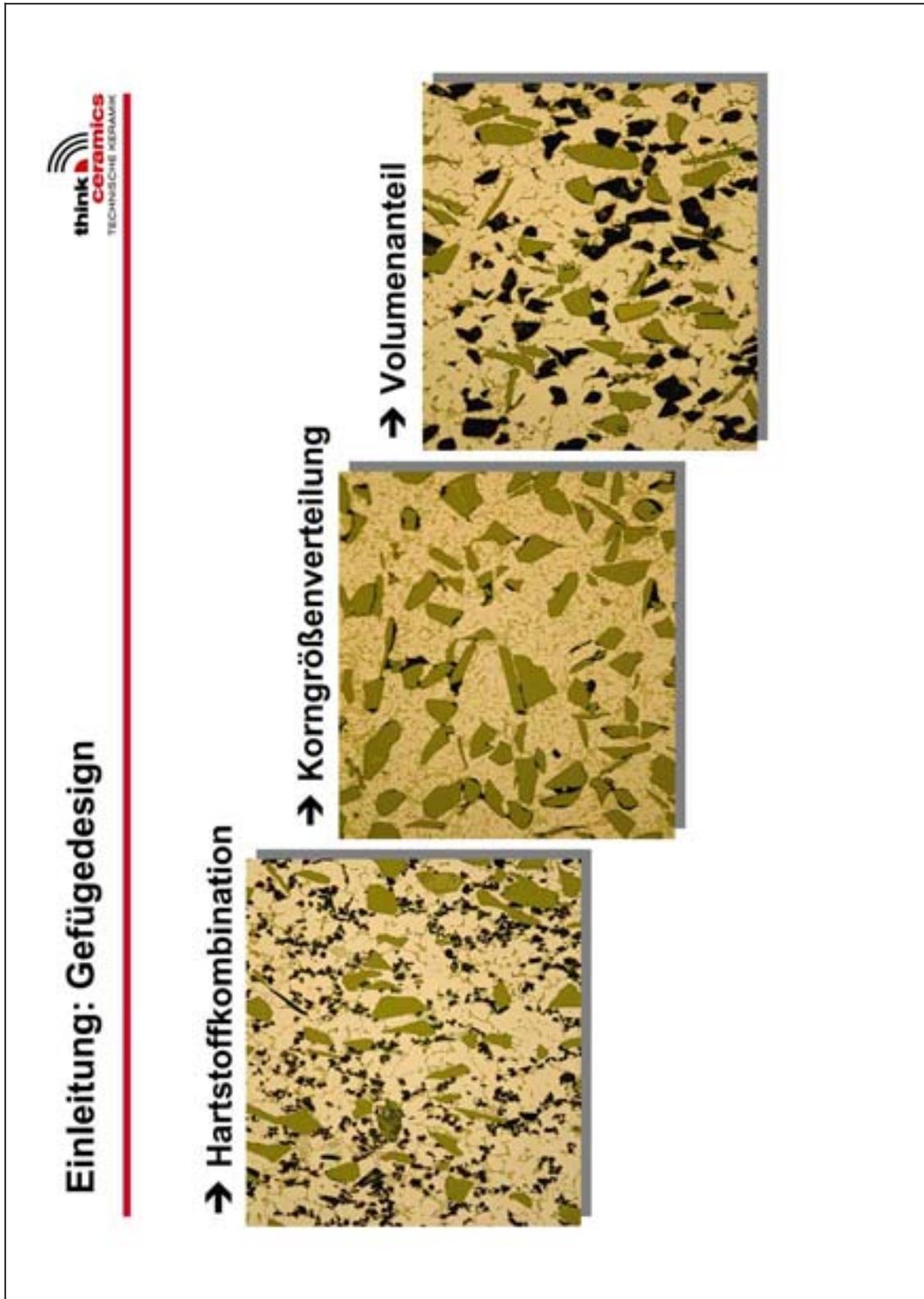


Poröse Keramik

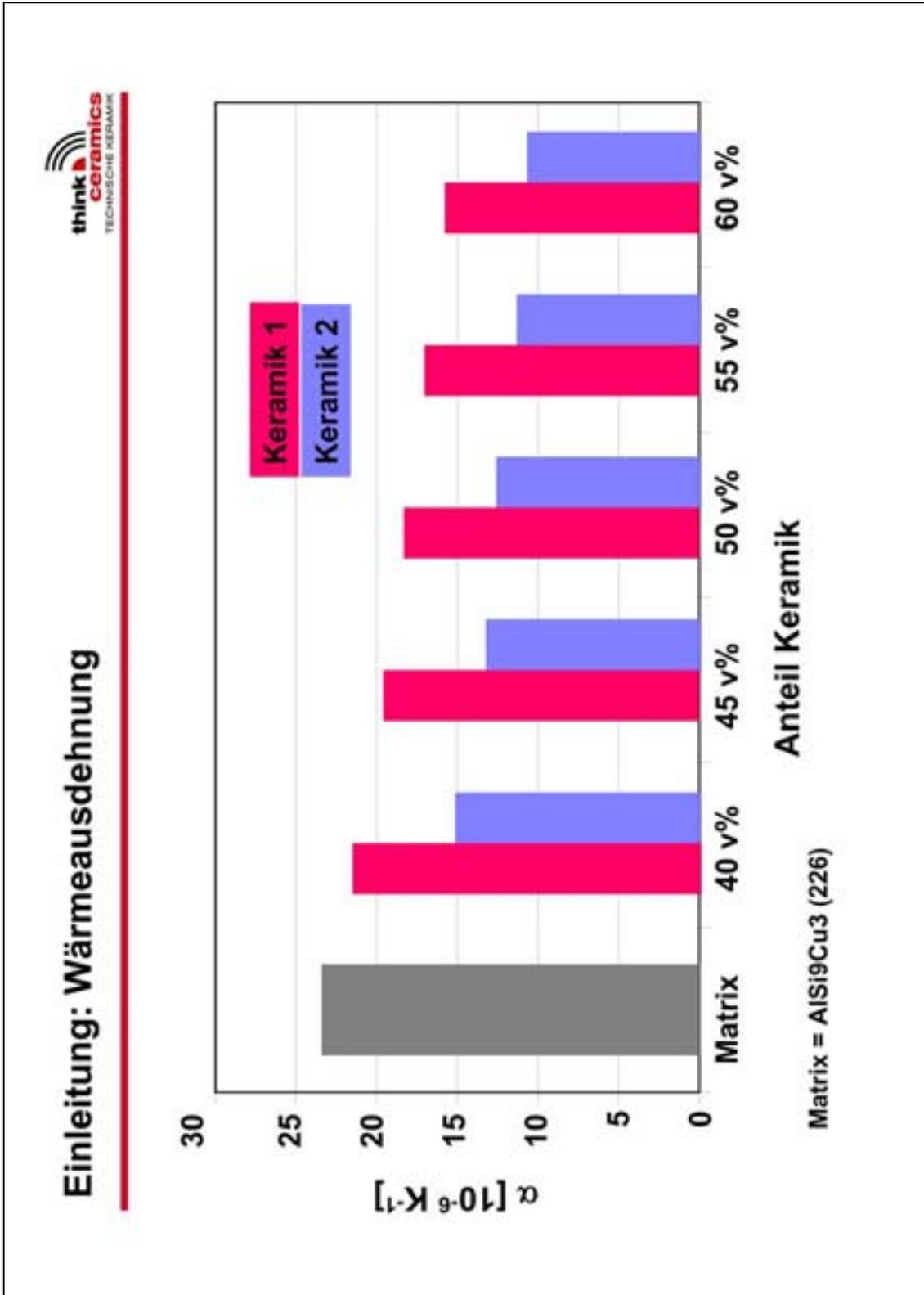
- Gefriergießen
- Axial-Pressen
- Isost-Pressen
- Extrudieren
- ...

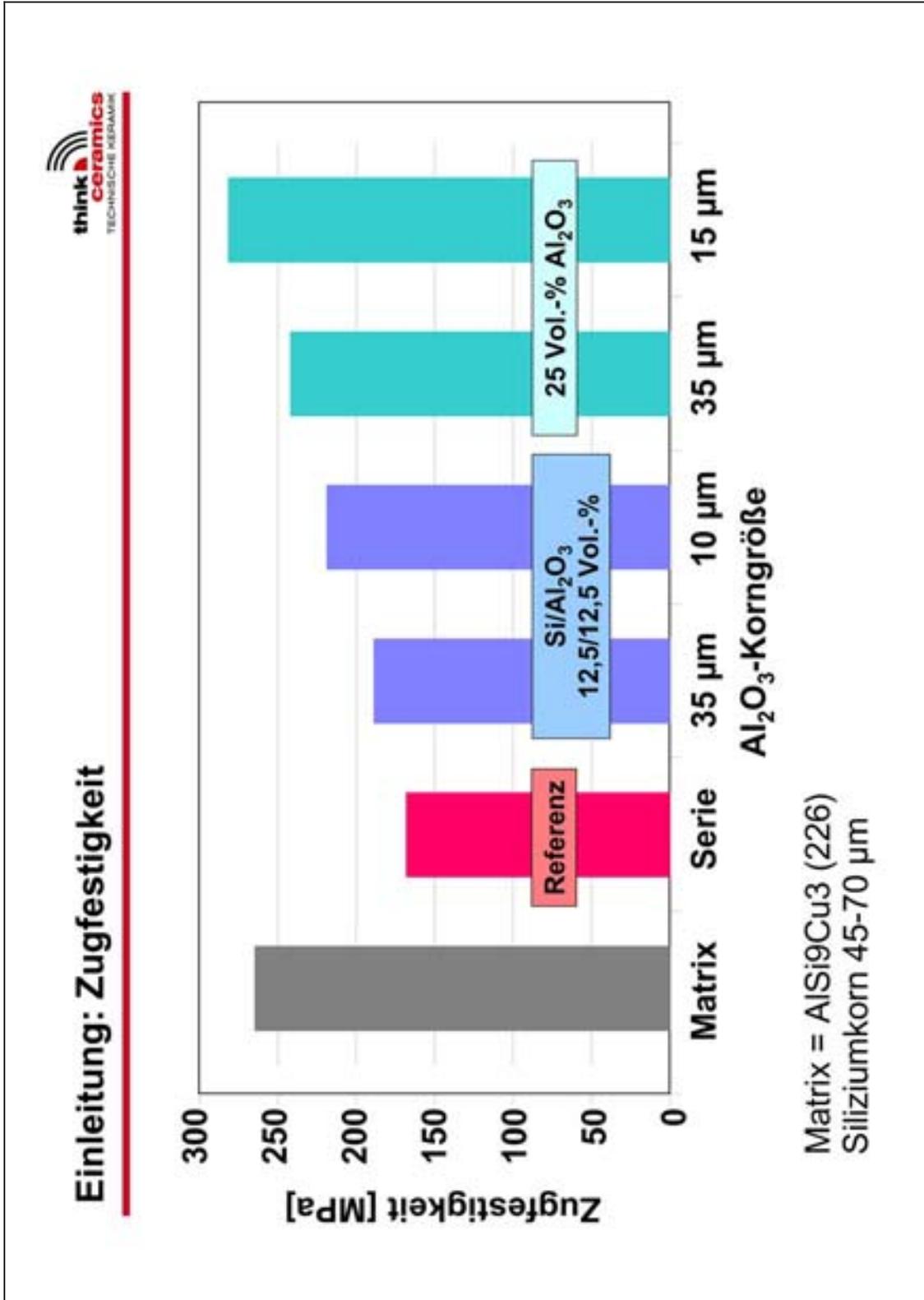
MMC / CMC / MKV

- Druckguss
- Squeezecasting
- drucklose Infiltration

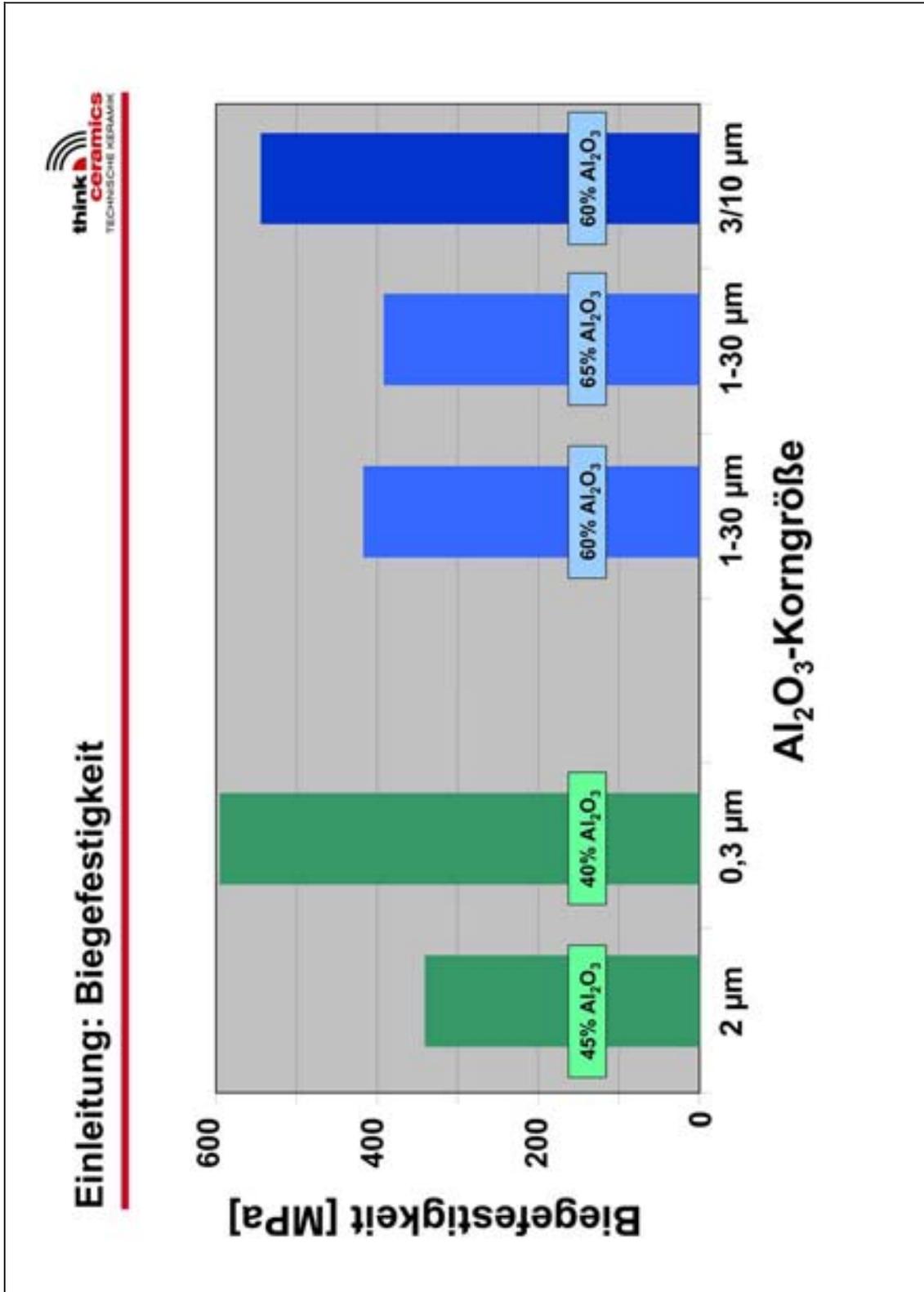


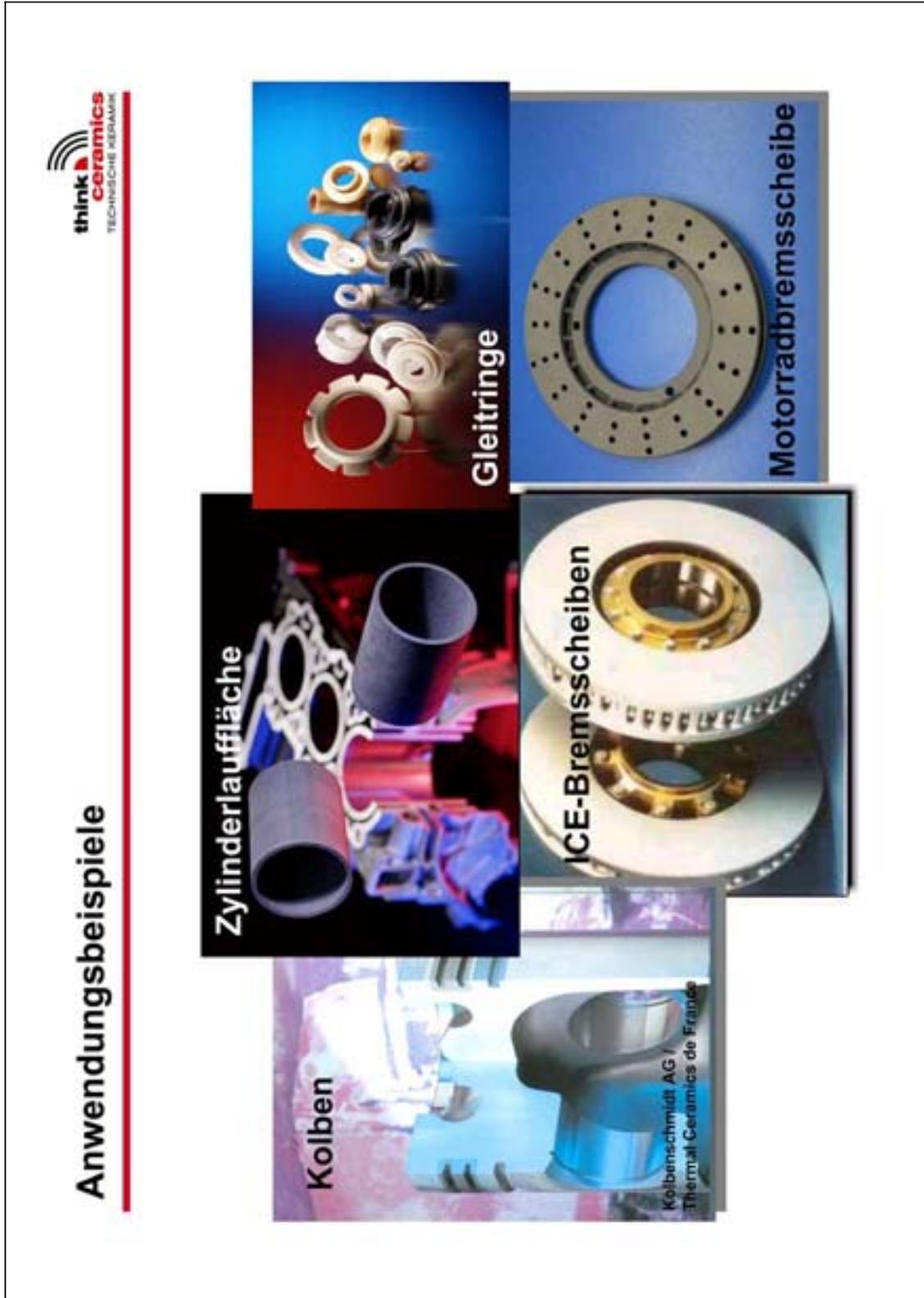
3.3 Metall-Keramik-Verbundwerkstoffe - Folie 7





3.3 Metall-Keramik-Verbundwerkstoffe - Folie 9



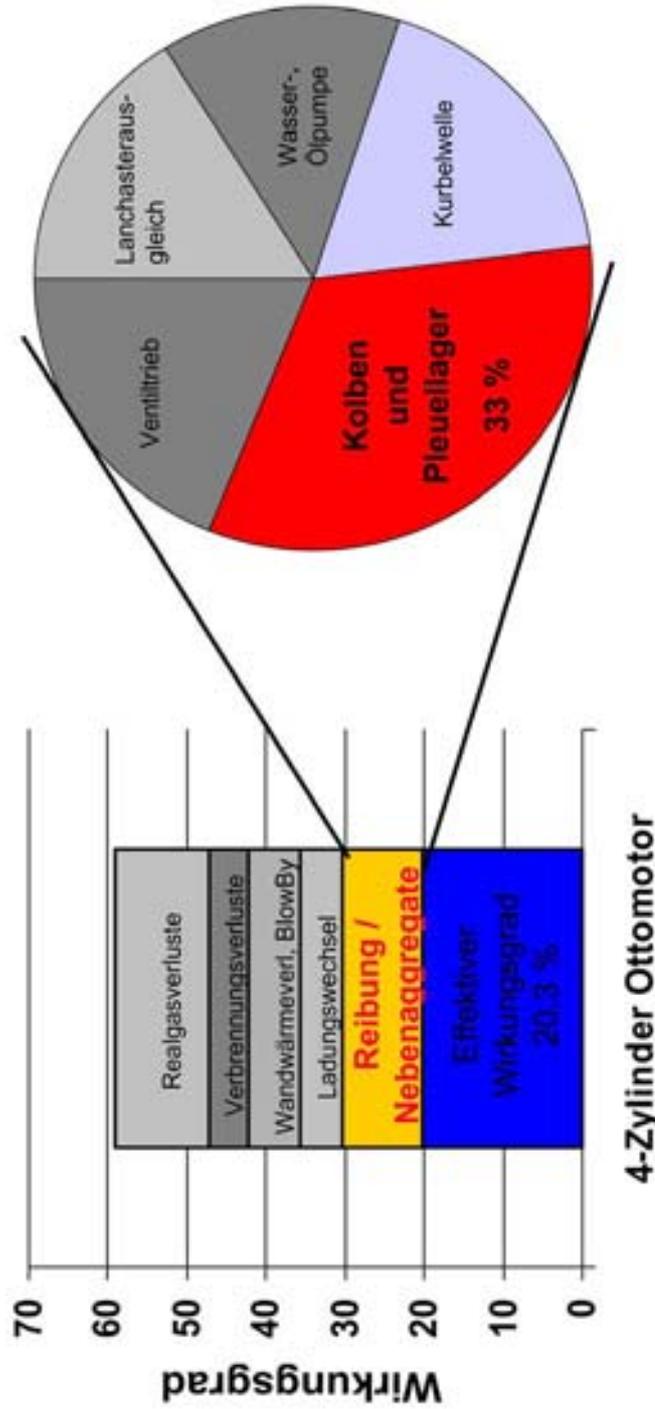


3.3 Metall-Keramik-Verbundwerkstoffe - Folie 11



Beispiel: Zylinderlauffläche

Verluste am Verbrennungsmotor Reibungsverluste am Verbrennungsmotor

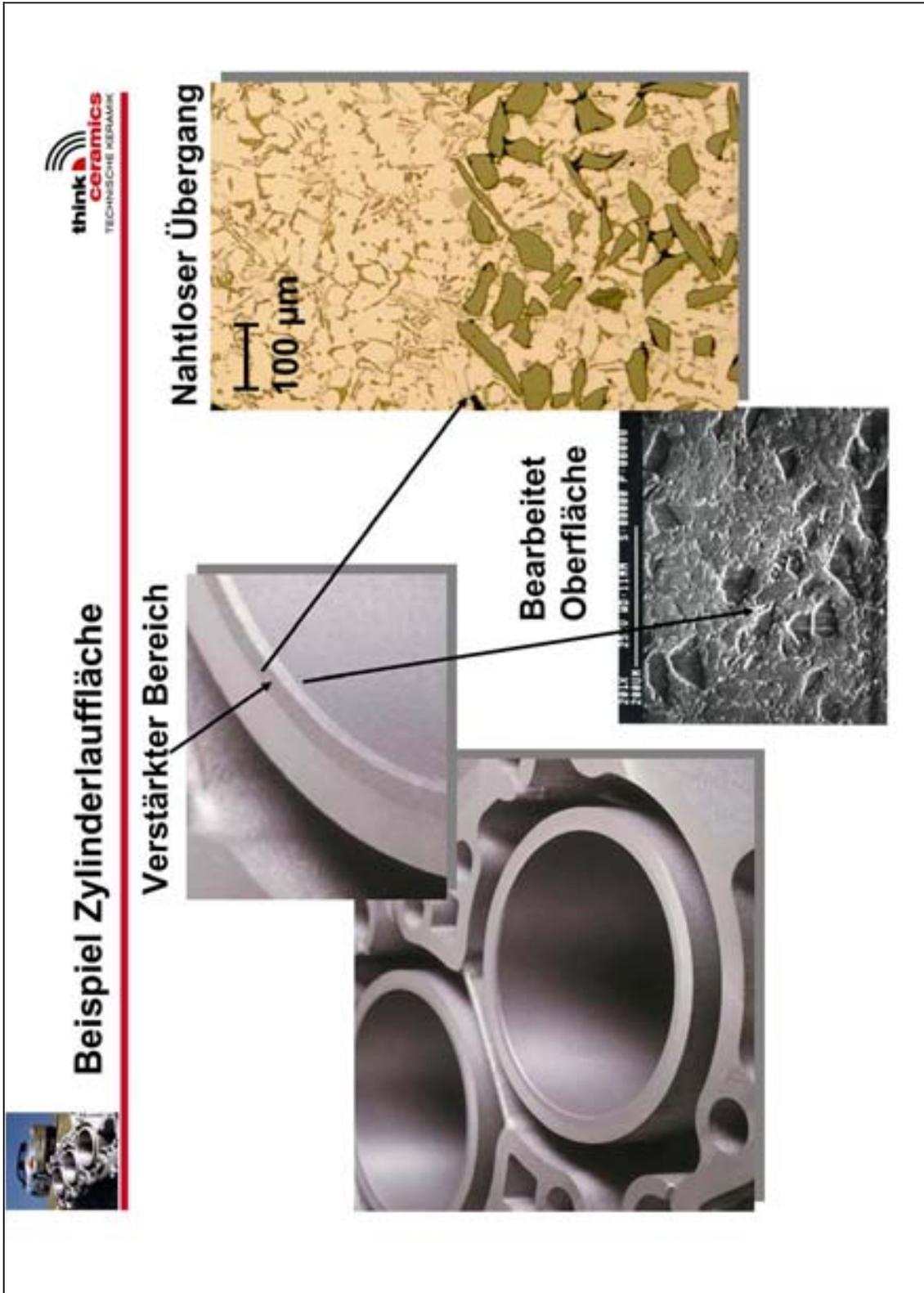


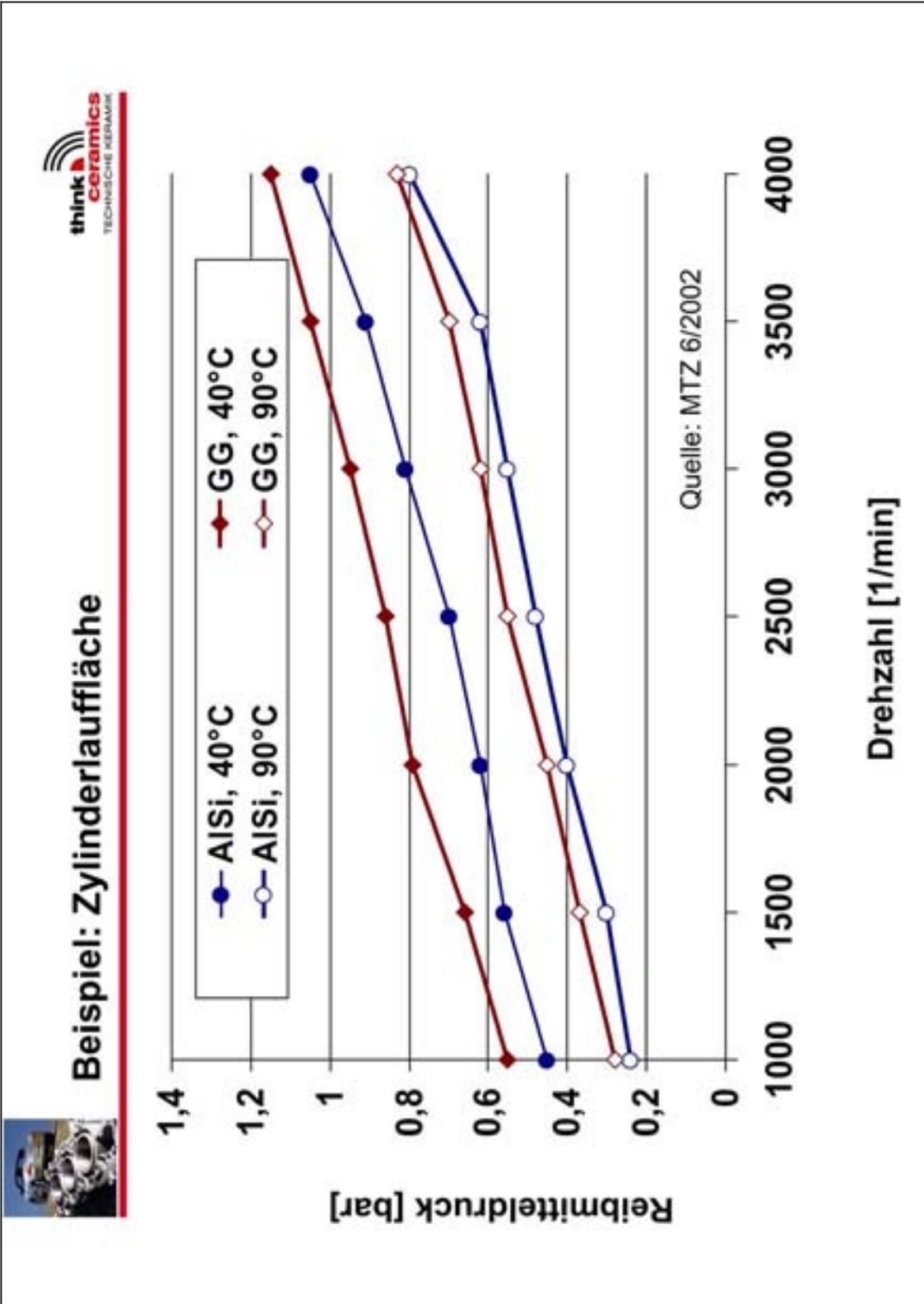
Quelle: VDI Bericht 1764, 2003

think ceramics
TECHNISCHE KERAMIK

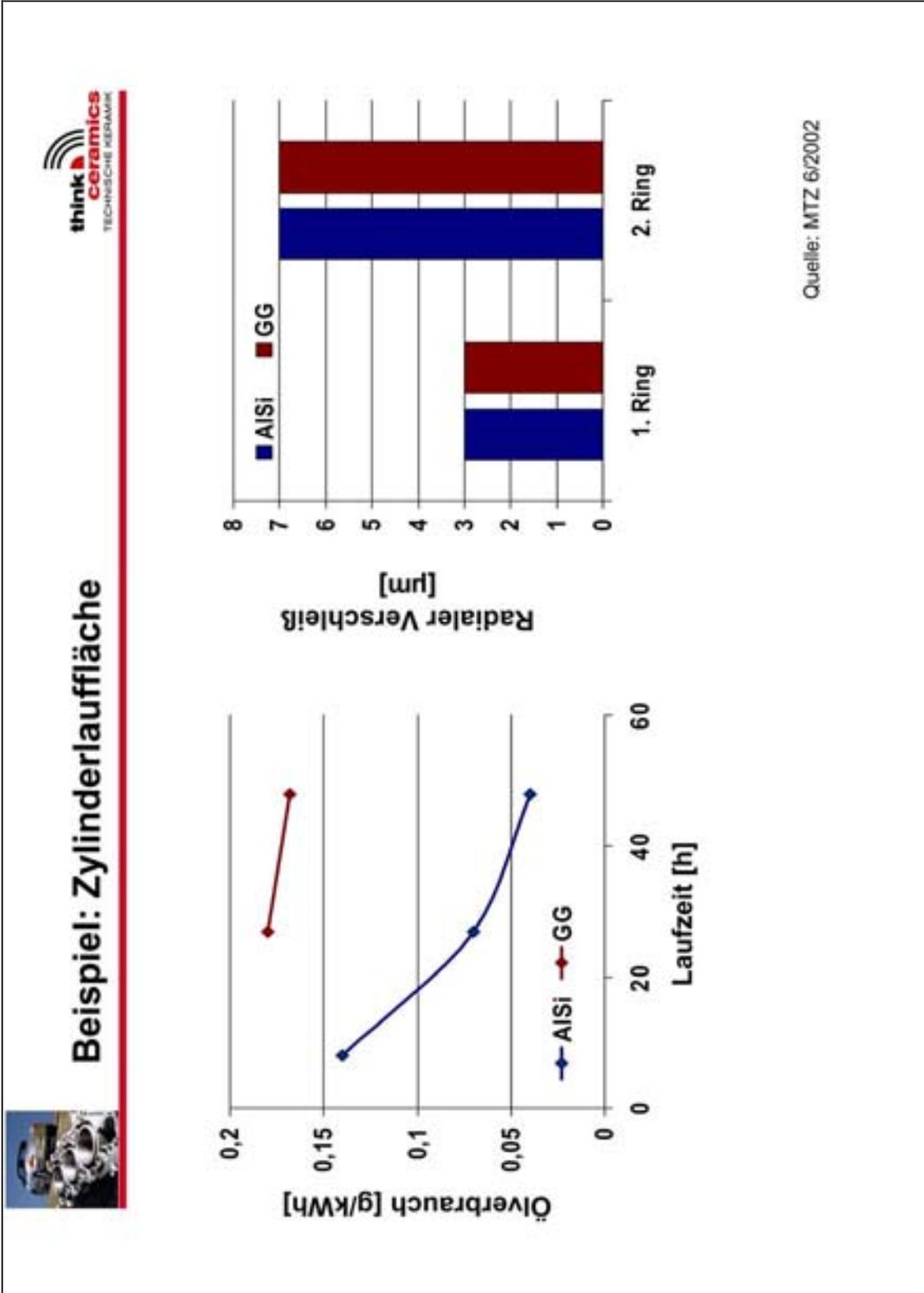
Beispiel: Zylinderlauffläche

Preform





3.3 Metall-Keramik-Verbundwerkstoffe - Folie 15



Quelle: MTZ 6/2002



Beispiel: Zylinderlauffläche

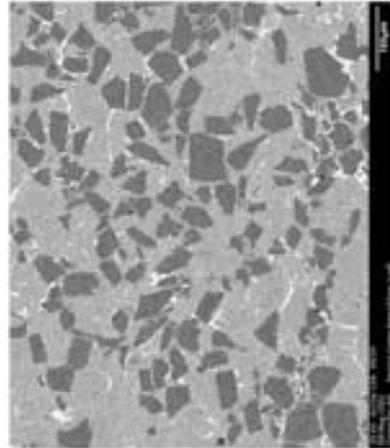
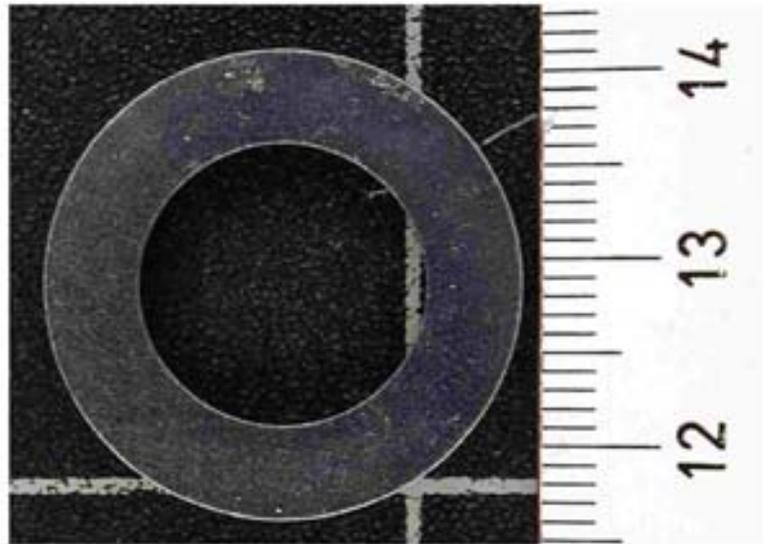


Zusammenfassung

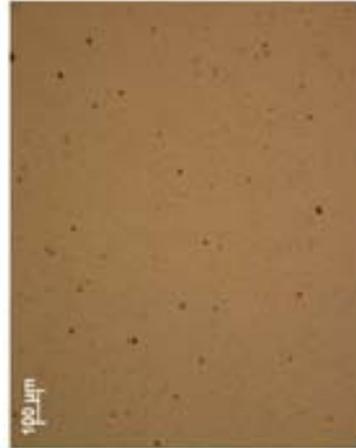
- Aluminium wird zunehmend für Kurbelgehäuse verwendet
- Al als Zylinder-Tribo-Werkstoff ungeeignet
- **AlSi als Zylinder Tribo-Werkstoff geeignet**
 - niedrigerer Reibwert
- **lokales Werkstoffengineering**
 - homogener Wärmefluss durch nahtlosen Werkstoffübergang
 - geringeres Spiel
 - höherer Komfort



Beispiel: Gleitringe



Al-SiC



SSiC



Beispiel: Gleitringe



Einbau / Temperaturmessung / Nasslauf





Beispiel: Gleitringe



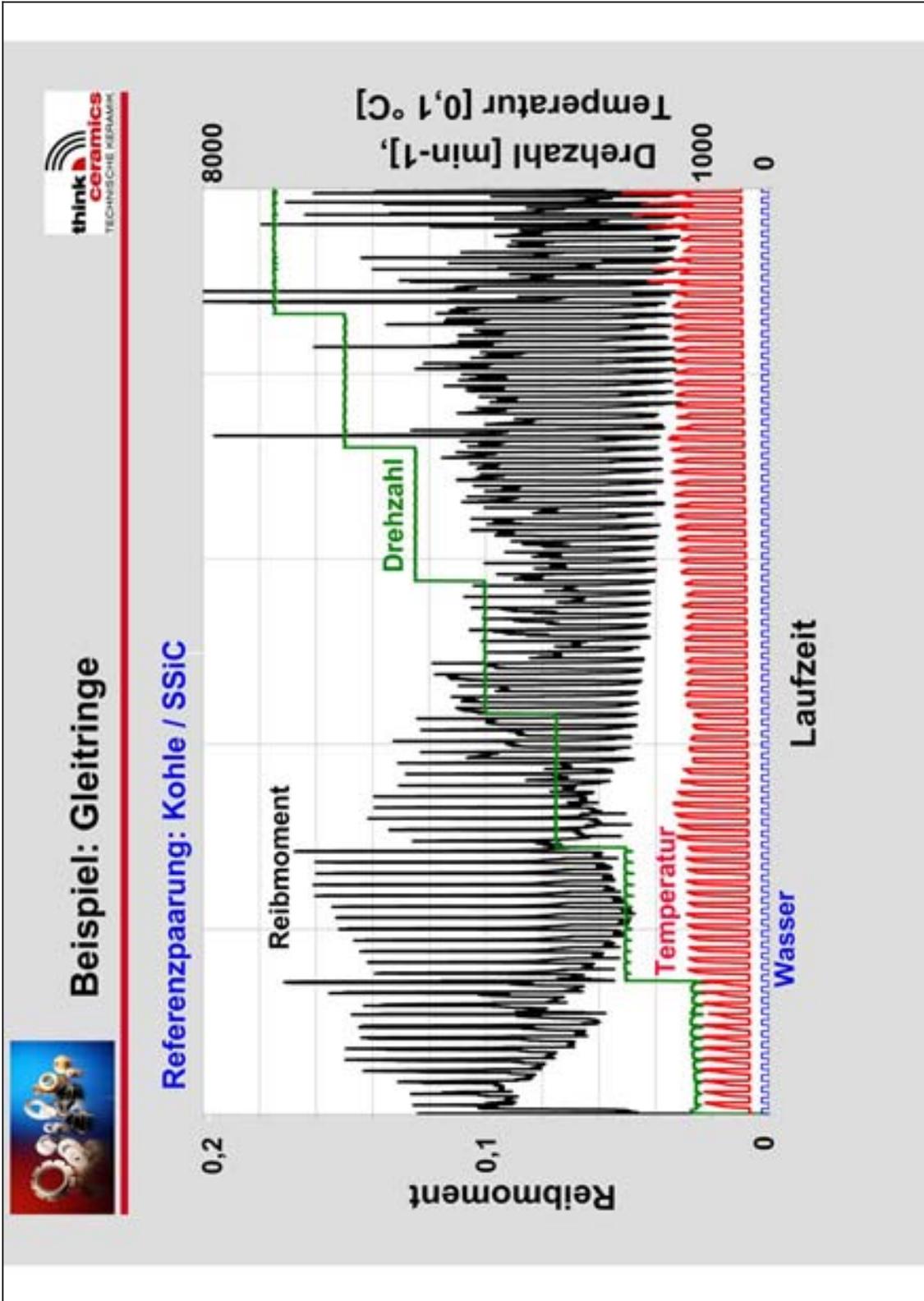
Aufbau Prüfstand

Messgrößen

- Drehzahl
- Temperatur
- Drehmoment

Variablen

- Drehzahl
- Nass- / Trockenlauf



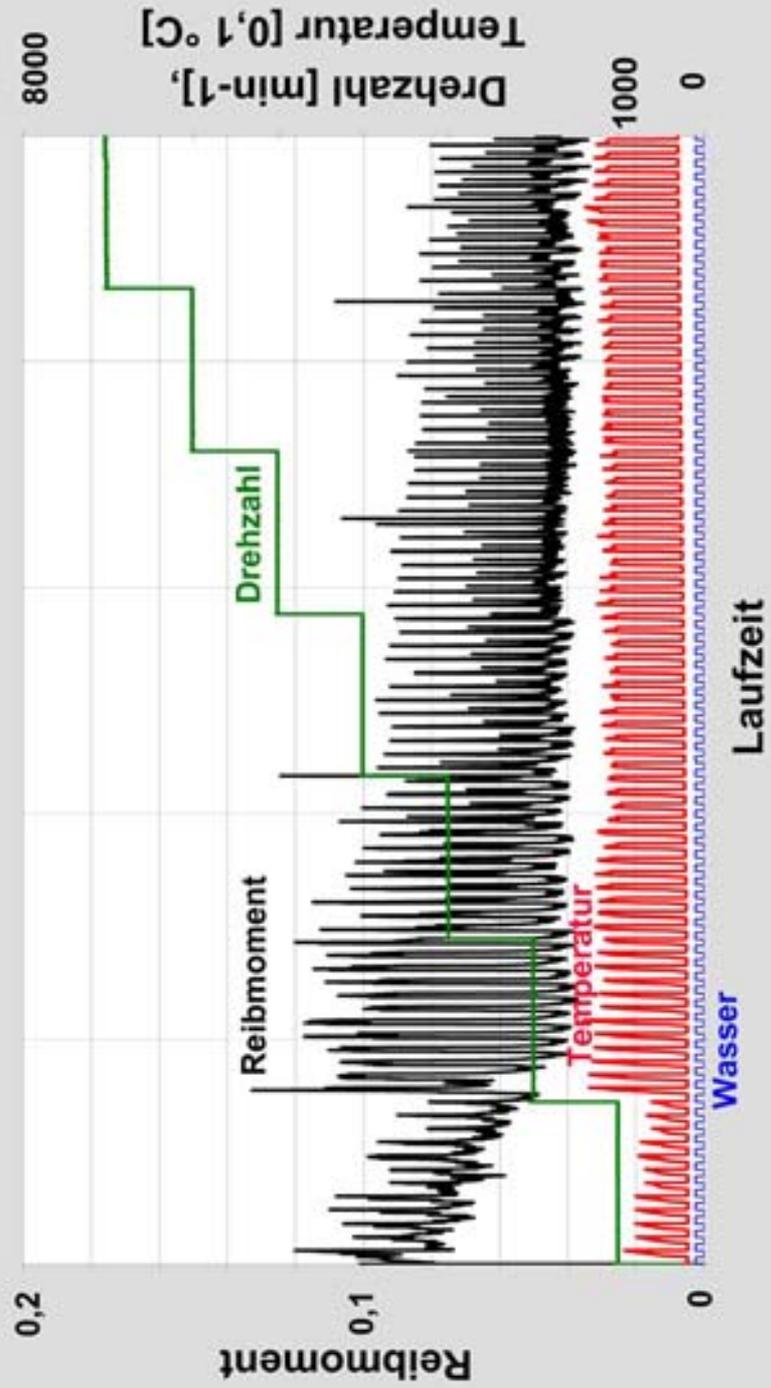
3.3 Metall-Keramik-Verbundwerkstoffe - Folie 21

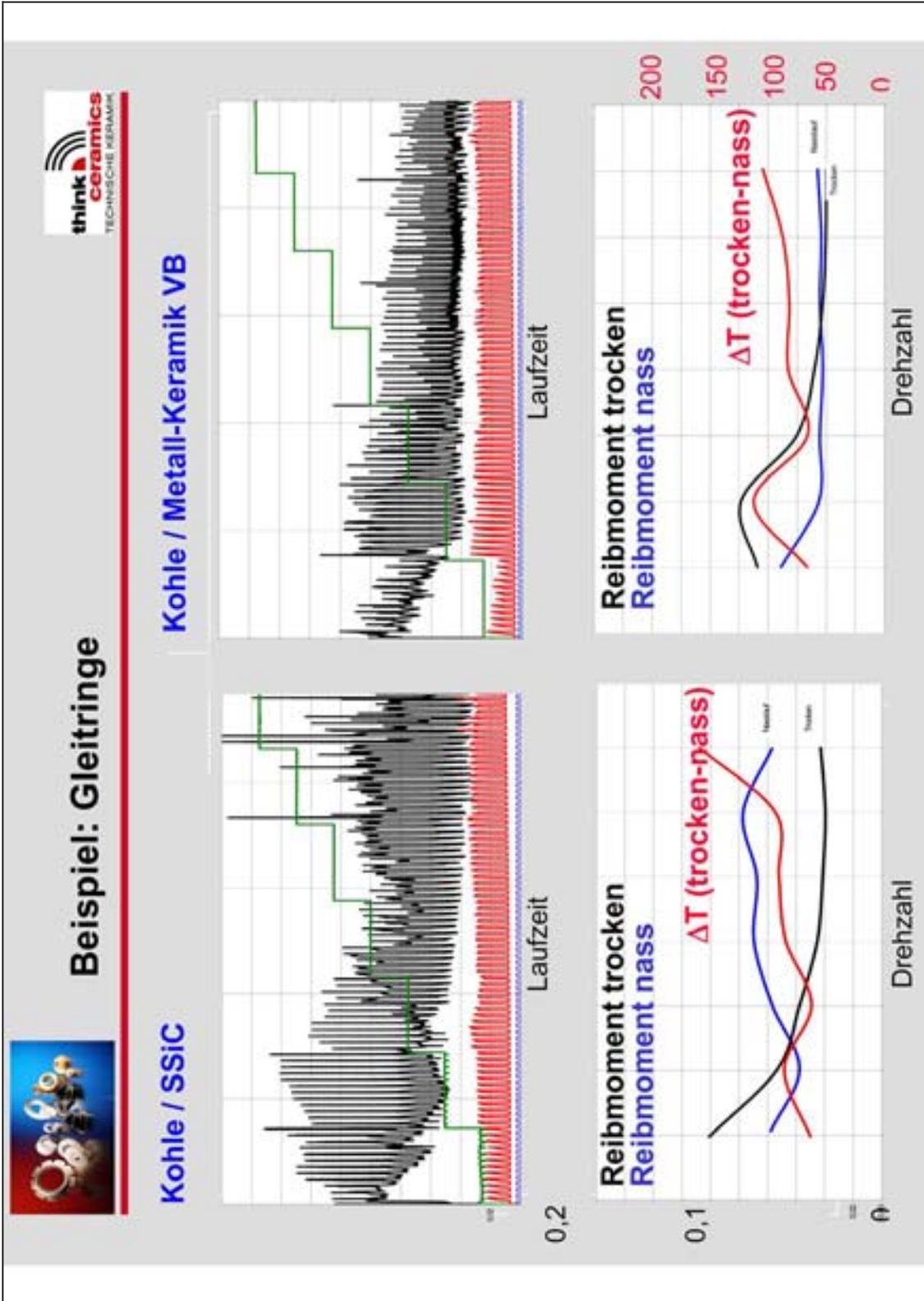


Beispiel: Gleitringe



Entwicklungspaarung: Kohle / Metall-Keramik Verbund





3.3 Metall-Keramik-Verbundwerkstoffe - Folie 23



Beispiel: Gleitringe

Zusammenfassung

- **Konzepttauglichkeit der Paarung Kohle/Al-SiC nachgewiesen**
- niedrigeres Reibmoment bei Nasslauf
- niedrigere Streubreite des Reibmoments
 - ruhigerer Lauf
 - niedriger Geräuschpegel
 - Potenzial zur höheren Lebensdauer
- niedrigere T-Differenzen bei hoher Drehzahl
- Trockenlauf vergleichbar mit Referenzpaarung
- **Herstellung mit engen Toleranzen möglich**
- **Herstellkosten geringer als bei SSiC**
- **Ermittlung der wesentlichen technischen Werkstoffparameter**
 - mechanische Eigenschaften
 - thermische Eigenschaften
 - korrosive Eigenschaften