

4.4. SiC für industrielle SiC- Anwendungen

- Josef Kracker
WACKER CERAMICS
Kempten

Die Folien finden Sie ab Seite 469.

SiC – Werkstoffe haben im chemischen Apparatebau wegen spezifischer Materialvorteile eine weite Verbreitung gefunden. Vor allem in wellendichtungslosen, magnetgekuppelten Chemiepumpen hat sich SiC als Gleitlagerwerkstoff bewährt. Bei Gleitringdichtungen in gedichteten Pumpen kommt SiC überwiegend in der Paarung gegen Kohle zum Einsatz.

Obwohl sich diese Lösungen in der Vergangenheit bewährt haben, gibt es von den Chemieproduzenten ständig steigende Anforderungen bezüglich sinkender Lebenszykluskosten und damit einhergehend zu längeren Wartungsintervallen bzw. zu verringerter Versagenswahrscheinlichkeit. Die „Meantime between failure“ (MTBF) wird zur Erfolgsformel.

4.4.1. Eigenschaften von SSiC

SiC-Werkstoffe bieten im Vergleich zu anderen Werkstoffen folgendes Eigenschaftsprofil:

- Sehr hohe Steifigkeit (vergleichbar zu Wolframcarbid)
- Geringe Dichte ($\sim 3,15 \text{ g/cm}^3$), ca. halb so groß wie bei Stahl
- Sehr hohe Härte und damit Verschleißfestigkeit, die nur von Diamant und kubischem Bornitrid übertroffen wird
- Sehr hohen Widerstand gegen thermischen Verzug, durch
 - Sehr geringe Wärmedehnung (ca. 1/3 von Stahl)
 - Sehr hohe Wärmeleitfähigkeit (ca. 4* höher als Stahl)

Diese Eigenschaften machen SiC zu einem sehr steifen und dabei dennoch leichten Konstruktionswerkstoff, der sich durch besondere Verschleißfestigkeit und Thermoschockbeständigkeit auszeichnet.

Die EN 12 756 (Verschlüsselung der Gleitringdichtungen) unterscheidet drei Klassen von SiC Werkstoffen:

- Q1: gesintertes SiC, genannt SSIC („sintered Siliconcarbide“) das die weiteste Verbreitung gefunden hat und im Folgenden weiter beschrieben wird
- Q2: infiltriertes SiC, genannt SISIC („Silicon-Siliconcarbide“), das freies, nicht gebundenes Silizium im Gefüge enthält und überwiegend Anwendung bei großen Geometrien findet
- Q3: SiC-Kohlenstoff Mischwerkstoffe, wie z.B. silizierte Kohle. Diese Werkstoffe wurden überwiegend für Sonderanwendungen konzipiert.

Eine Eigenschaft prädestiniert SiC vor allen anderen (auch keramischen) Werkstoffen für den chemischen Apparatebau: die **hervorragende Korrosionsbeständigkeit gegen nahezu alle Medien**. SSIC (Q1 – Qualität) stellt dabei alle anderen SiC Werkstoffqualitäten in den Schatten.

4.4.2. Durch Modifizierung einstellbare Eigenschaften

4.4.2.1. Festigkeit

Keramische Werkstoffe gelten generell als spröde und als gering zug- bzw. biegefest. Dies verhinderte bisher einen breiten Einsatz als Konstruktionswerkstoff. Bei spröden Werkstoffen wird die Festigkeit und die Versagenswahrscheinlichkeit vom größten im Gefüge vorkommenden Fehler (z. B. Pore) bestimmt. Die Festigkeit des Werkstoffs kann daher vergrößert werden, indem

- die Fehler im Gefüge durch Nachverdichten verkleinert und somit die Versagenswahrscheinlichkeit erheblich vermindert wird und

- die Bruchzähigkeit durch z. B. den Einbau einer Korngrenzenphase wie im „flüssigphasen-gesinterten SiC“ verbessert wird. Dadurch wird die Festigkeit um ca. 50% erhöht.

Die hohe Festigkeit des flüssigphasen-gesinterten SiC, gepaart mit der hohen Steifigkeit und dem geringen thermischen Verzug prädestiniert den Werkstoff für Dichtringe in schnell rotierenden Kompressor-gasdichtungen, wo Drehgeschwindigkeiten von über 45.000 U/min bei Flughöhen von nur 3 bis 5 μm erreicht werden.

4.4.2.2 Korrosionsverhalten

Das ohnehin schon hervorragende Korrosionsverhalten des SSIC kann darüber hinaus durch ein gröberes Gefüge weiter verbessert werden. Dies wird durch eine Verringerung der Anzahl der Korngrenzen, die durch Heißwasser korrosiv angegriffen werden, bewirkt. Die Standzeit kann durch den Einsatz von grobkörnigem SSIC in einigen Medien im Vergleich zu Standard-SSIC mehr als verdoppelt werden.

4.4.2.2 Reibungs- und Verschleißwiderstand

SSIC weist in der Trockenreibung, gegen sich selbst gepaart, einen Reibbeiwert von ca. 0,7 auf und ist damit ein sogenannter „Bremsenwerkstoff“. Aus diesem Grund wird in fast allen Dichtungsanwendungen die sogenannte hart/weich Paarung bevorzugt, die den SSIC-Ring gegen einen weichen Kohlering laufen lässt. Die Kohle weist dabei eine vergleichbare Korrosionsbeständigkeit auf und bietet darüber hinaus eine exzellente Trockenlauffähigkeit.

Der bekannteste Trockenschmierstoff ist Graphit. Der Vorteil der Trockenlauffähigkeit geht allerdings zu Lasten von Festigkeit und Härte und führt damit zu einer erhöhten Verschleißrate.

Die optimale Lösung ist die trockenlauffähige hart/hart Dichtungs-paarung. Durch die aktive Bindung von partikulärem Graphit in der SSIC-Matrix gelingt es, den Reibbeiwert der beiden SSIC Gegenläufer kurzzeitig (2-3 min) auf 0,25 zu reduzieren.

Stellt man zusätzlich das grobkörnige SSIC Gefüge ein, so erhöht sich auch die Tragfähigkeit des Werkstoffs im Nasslauf, da die sich einstellende Oberflächentopographie die verbleibende Schmierflüssigkeit besser zurückhält. Im Vergleich zu herkömmlichem SSIC kann die Tragfähigkeit mit grobkörnigem Gefüge um Faktor 2, bei gleichzeitig eingebundenem partikulären Grafit um Faktor 3 erhöht werden.

Ergebnis:

Der Mischreibungsbereich wird zu anderen p_v (Druck x Geschwindigkeit) –Werten verschoben. Die Versagenswahrscheinlichkeit von Dichtungen und Lagern wird stark verringert, bzw. die Lebensdauer extrem erhöht.

4.4.3. Zusammenfassung

Durch gezielte Modifikation des Gefüges gelingt es Keramikerstellern, ihre Werkstoffe anwendungsspezifisch zu trimmen und dabei den Materialien die selbst unter Konstrukteuren gefürchteten Eigenschaften abzugewöhnen. Dadurch erschließen sich SSIC Werkstoffe immer mehr Anwendungsbereiche

- in korrosivem Umfeld und
- bei hohen Temperaturen,

wobei

- geringe Dichte,
- hohe Formstabilität,
- hoher Verschleißwiderstand und
- gute tribologische Eigenschaften

gefordert sind.

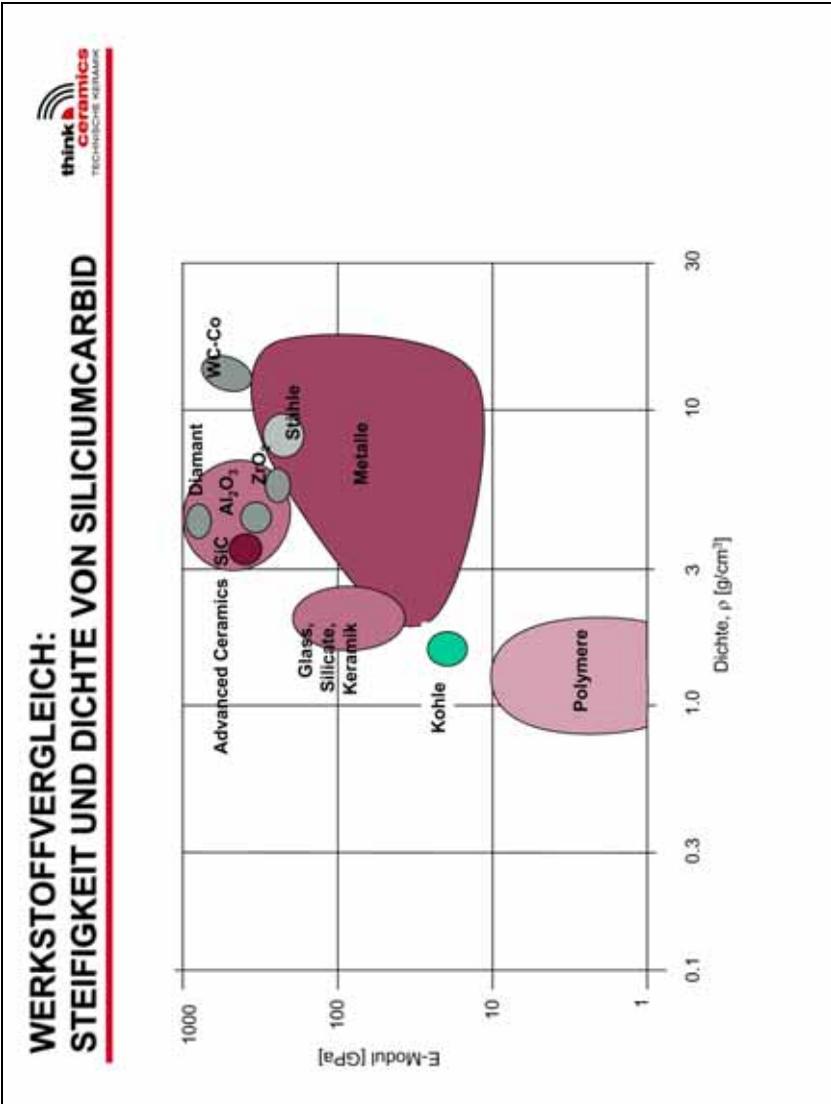
Die verwendeten Vortragsfolien (Nr. 1 bis 33) finden sich auf den folgenden Seiten.

Maschinen- und Anlagenbau

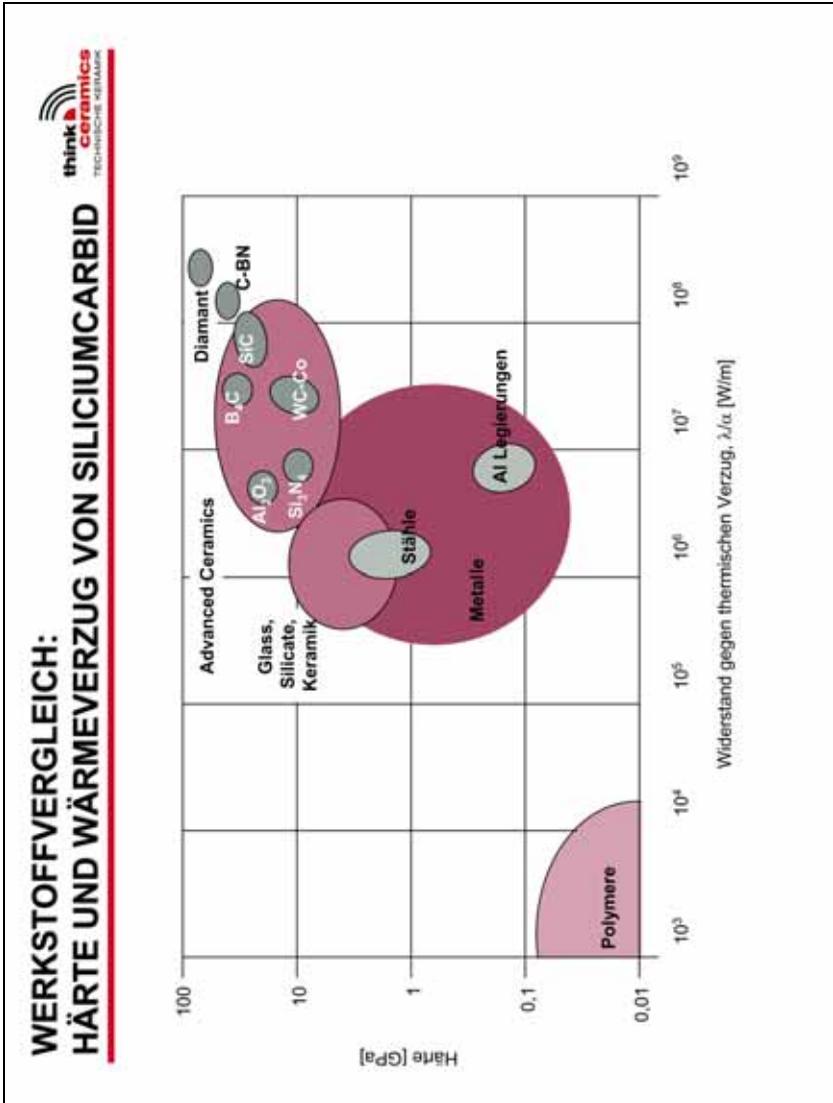
Keramik und Tribologie – Verschleiß Industrielle SiC-Anwendungen

Josef Kracker
WACKER CERAMICS
Kempten

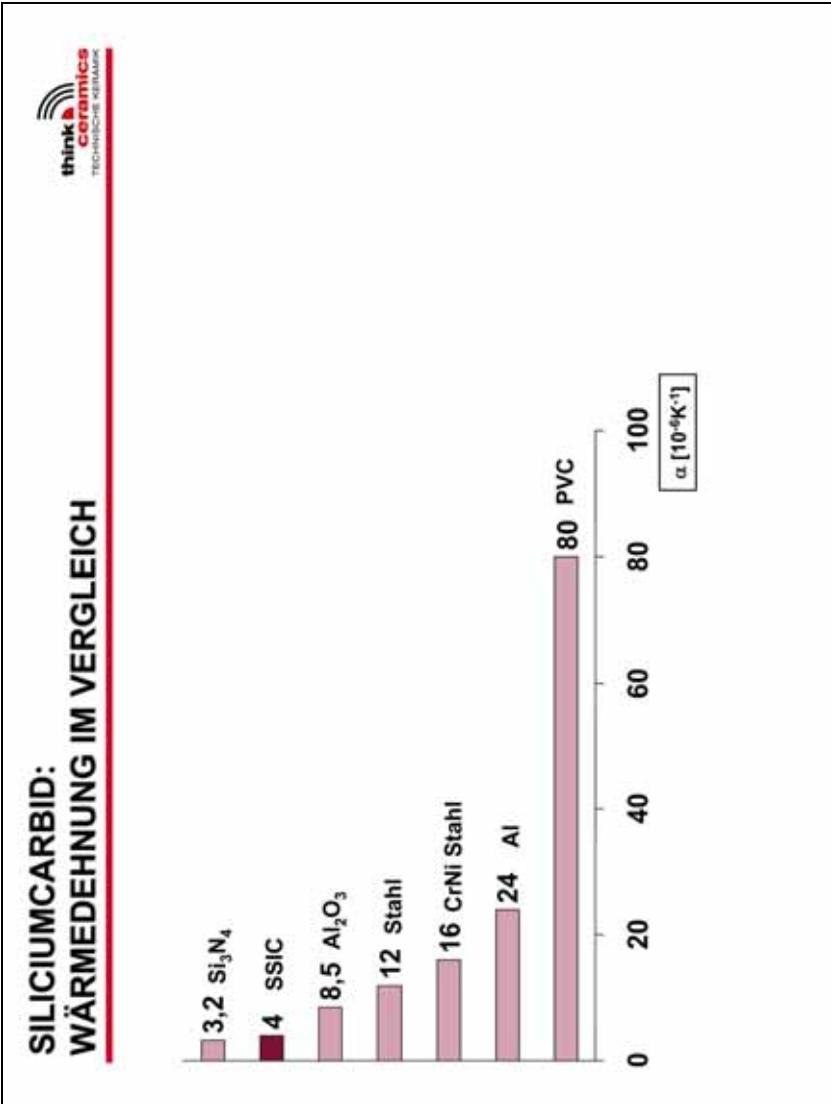




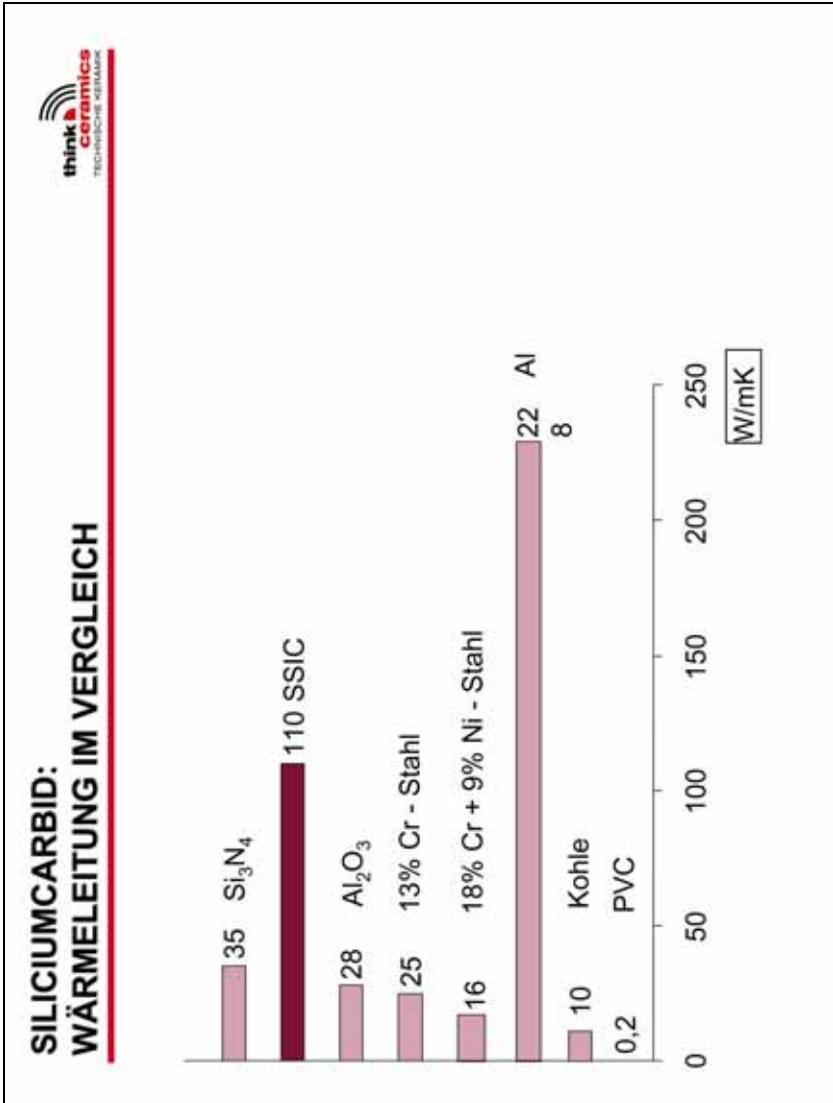
4.4. SiC-Anwendungen - Folie 2



4.4. SiC-Anwendungen - Folie 3



4.4. SiC-Anwendungen - Folie 4

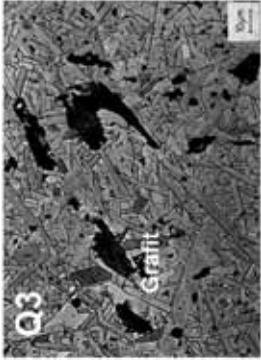
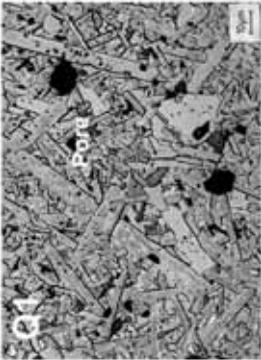


4.4. SiC-Anwendungen - Folie 5

think
ceramics
TECHNOLOGIE VERBUNDEN

DIN-KLASSIFIZIERUNG VON SILICIUMCARBID

Class	Material
Q1	SSiC
Q2	SiSiC
Q3	Si-C-SiC, C-SiC



4.4. SiC-Anwendungen - Folie 6

SILICIUMCARBID: DER MASSSTAB IN KORROSIONSBESTÄNDIGKEIT

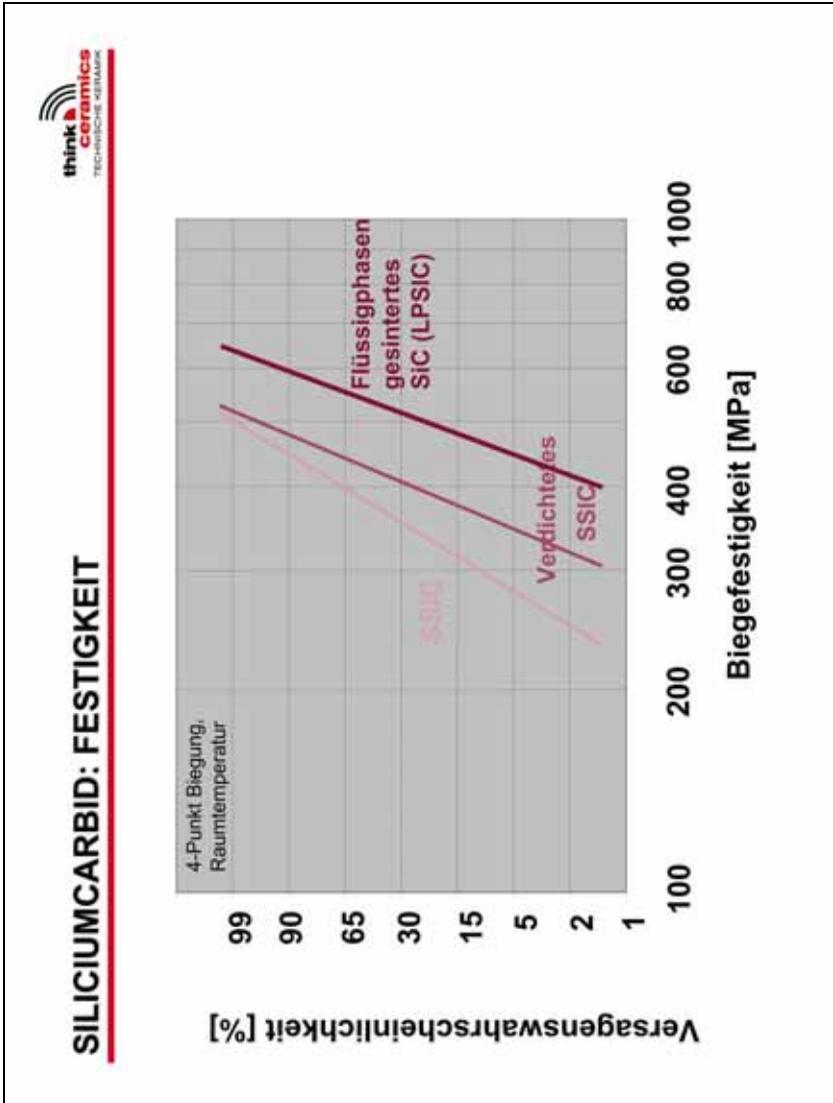
Gewichtsverlust (mg/cm² Jahr)

Chemische Substanz	Temperatur [°C]	SSIC	SISIC (12% Si)	Al ₂ O ₃ (99%)	Si ₃ N ₄	WC (6% CO)
98% H ₂ SO ₄	100	1,5	55	65	100	> 1000
50% NaOH	100	2,5	> 1000	200	200	5
53% HF	100	< 0,2	8	> 1000	> 1000	8
85% H ₃ PO ₄	100	< 0,2	9	> 1000	60	55
70% HNO ₃	100	< 0,2	0,5	7	6	> 1000
45% KOH	100	< 0,2	> 1000	60	30	3
25% HCl	100	< 0,2	0,9	10	20	85
10% HF + 57% HNO ₃	25	< 0,2	> 1000	16	> 1000	> 1000

Versuchsbedingungen: 125 bis 300 Stunden, kontinuierliches Rühren



4.4. SiC-Anwendungen - Folie 8



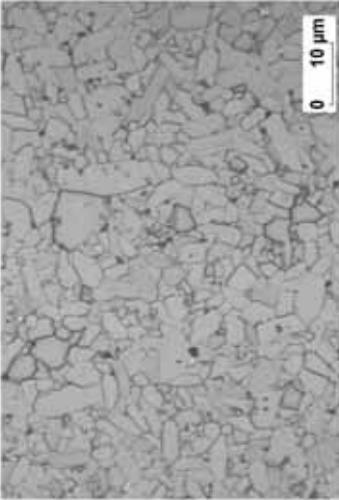
4.4. SiC-Anwendungen - Folie 9

think ceramics
TECHNOLOGIE VERBUNDEN

GEFÜGE: SSIC

Mittlere Korngröße:
5 μm

Dichte:
> 97 %



The micrograph shows a dense, polycrystalline microstructure of SiC. The grains are irregular in shape and size, with a typical diameter around 5 micrometers. The grain boundaries are clearly visible as thin, dark lines. A scale bar in the bottom right corner of the image indicates a length of 10 micrometers.

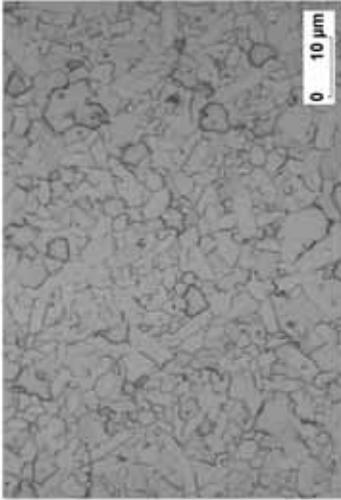
4.4. SiC-Anwendungen - Folie 10

think ceramics
TECHNISCHE KERAMIK

GEFÜGE: VERDICHTETES SSiC

Mittlere Korngröße:
< 5 μm

Dichte:
> 99%



0 10 μm

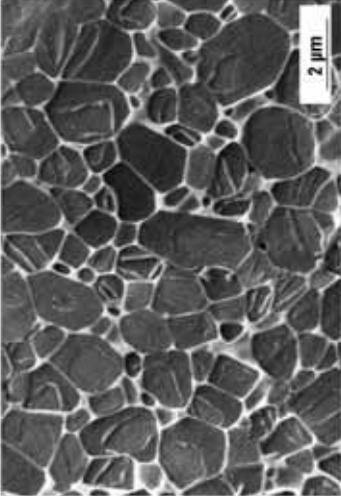
4.4. SiC-Anwendungen - Folie 11

think ceramics
TECHNOLOGIE VERBUNDEN

GEFÜGE: FLÜSSIGPHASEN GESINTERTES SiC

Mittlere Korngröße:
< 2 μm

Dichte:
> 99 %

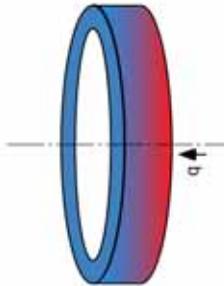


2 μm

4.4. SiC-Anwendungen - Folie 12

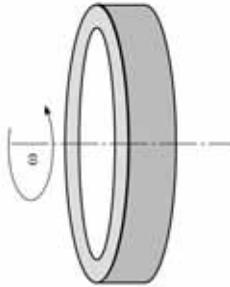
MATERIALAUSWAHL FÜR GASDICHTUNGEN

Thermischer Verzug
(Leckage, Druck)

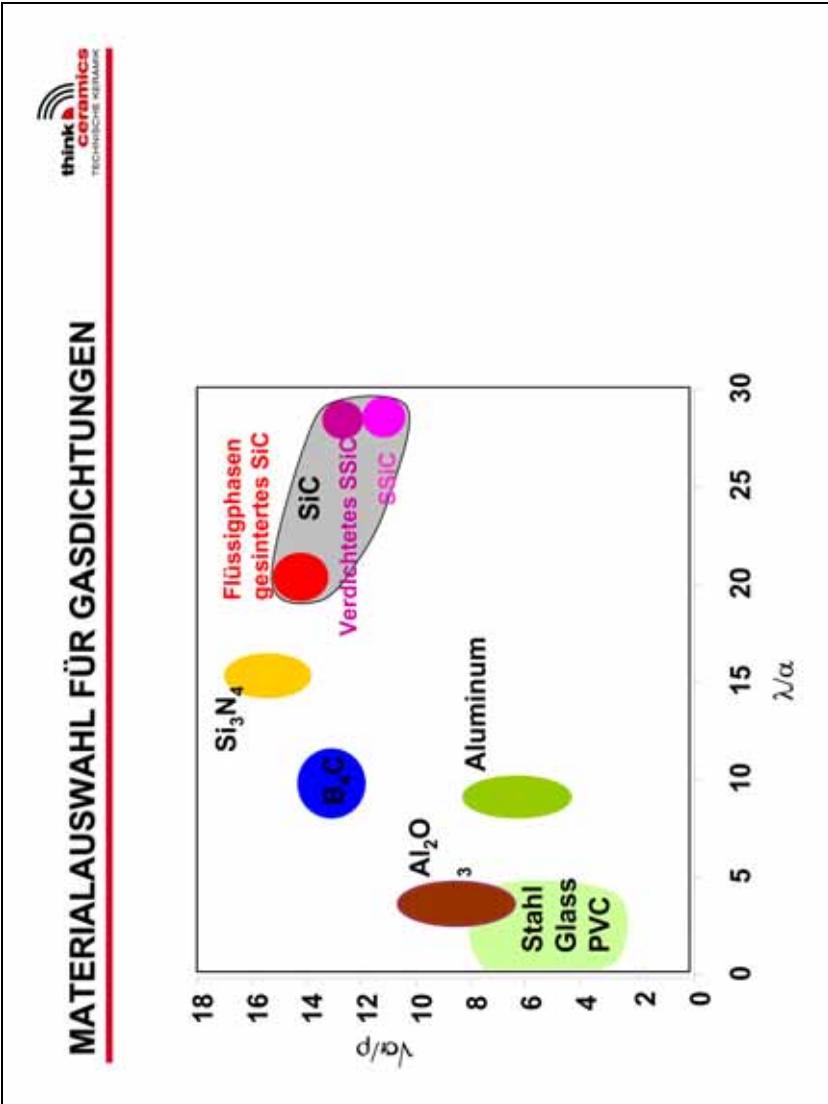


$$\frac{\lambda}{\alpha} \rightarrow \text{Max!}$$

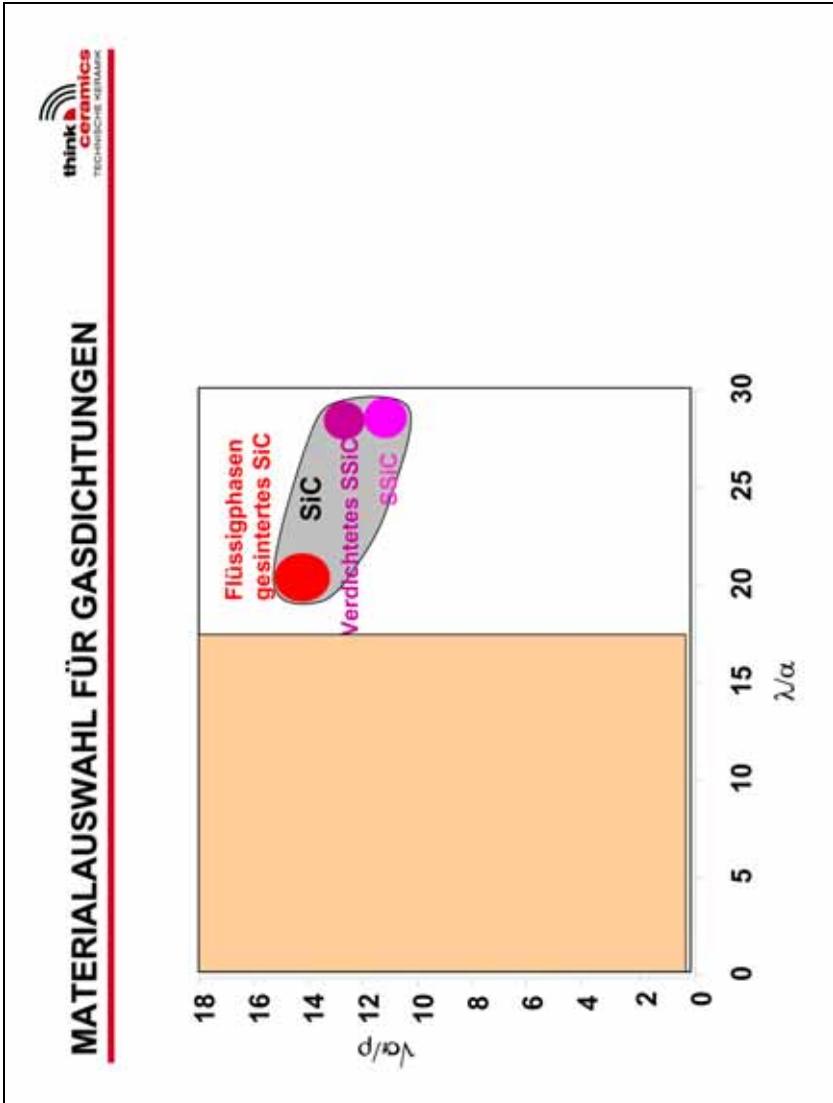
Zugspannungen in rotierenden
Ringen



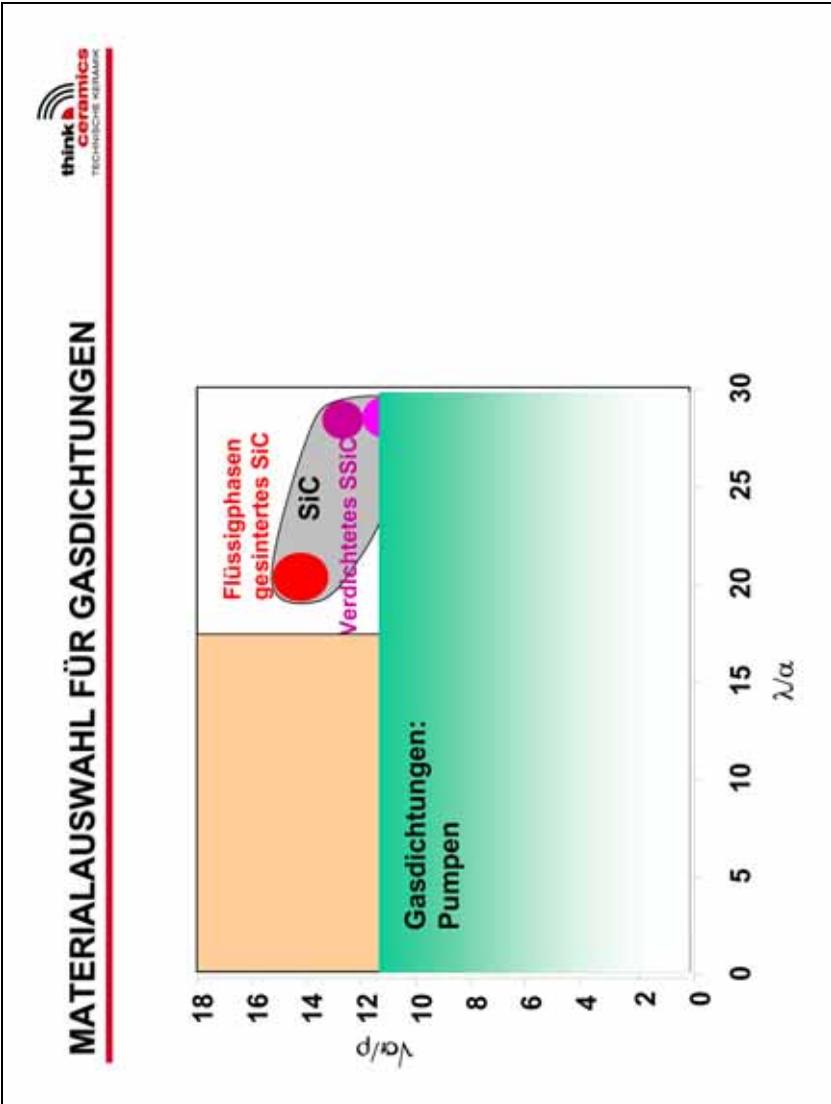
$$\sqrt{\frac{\sigma_r}{\rho}} \rightarrow \text{Max!}$$



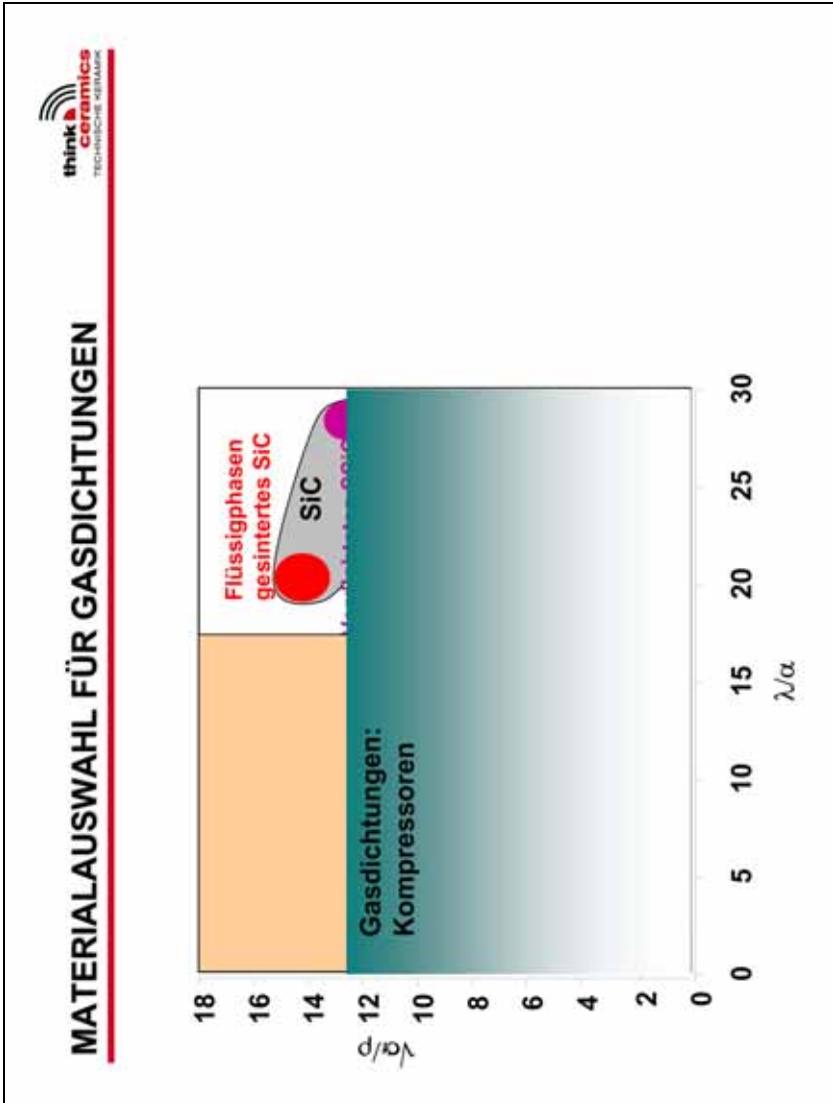
4.4. SiC-Anwendungen - Folie 14



4.4. SiC-Anwendungen - Folie 15

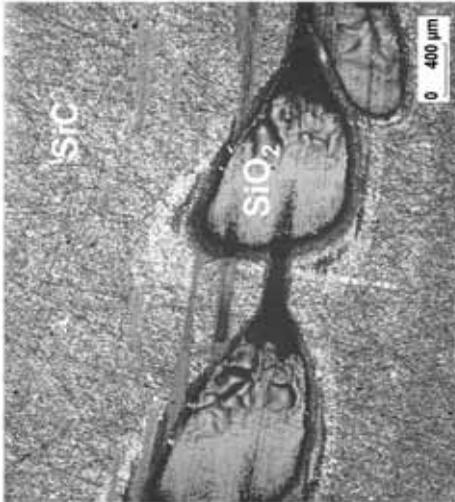


4.4. SiC-Anwendungen - Folie 16



4.4. SiC-Anwendungen - Folie 17

HEISSWASSER - KORROSION?



Feinkörniges SSiC



VE- Wasser, 140°C, 6 bar

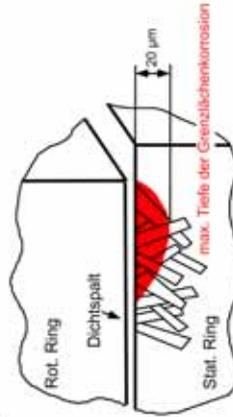
4.4. SiC-Anwendungen - Folie 18

GROBKÖRNIGES SSIC: ERHÖHTER KORROSIONSWIDERSTAND



Ziel:

- Verringerung der Korngrenzflächen
- Feste Verankerung der Körner in der Tiefe



Lösung:

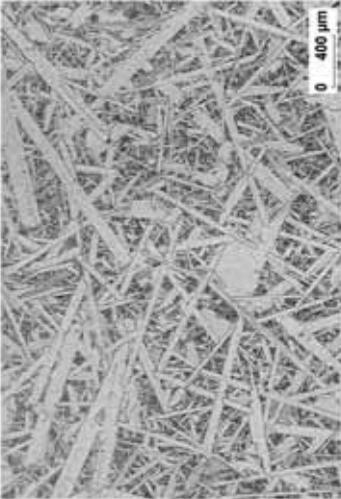
- Korngrößen über 500 µm
- Bimodale Korngrößenverteilung

think ceramics
TECHNOLOGIE VERBUNDEN

GEFÜGE: GROBKÖRNIGES SSIC

Korngrößenbereich:
10- 1500 μm

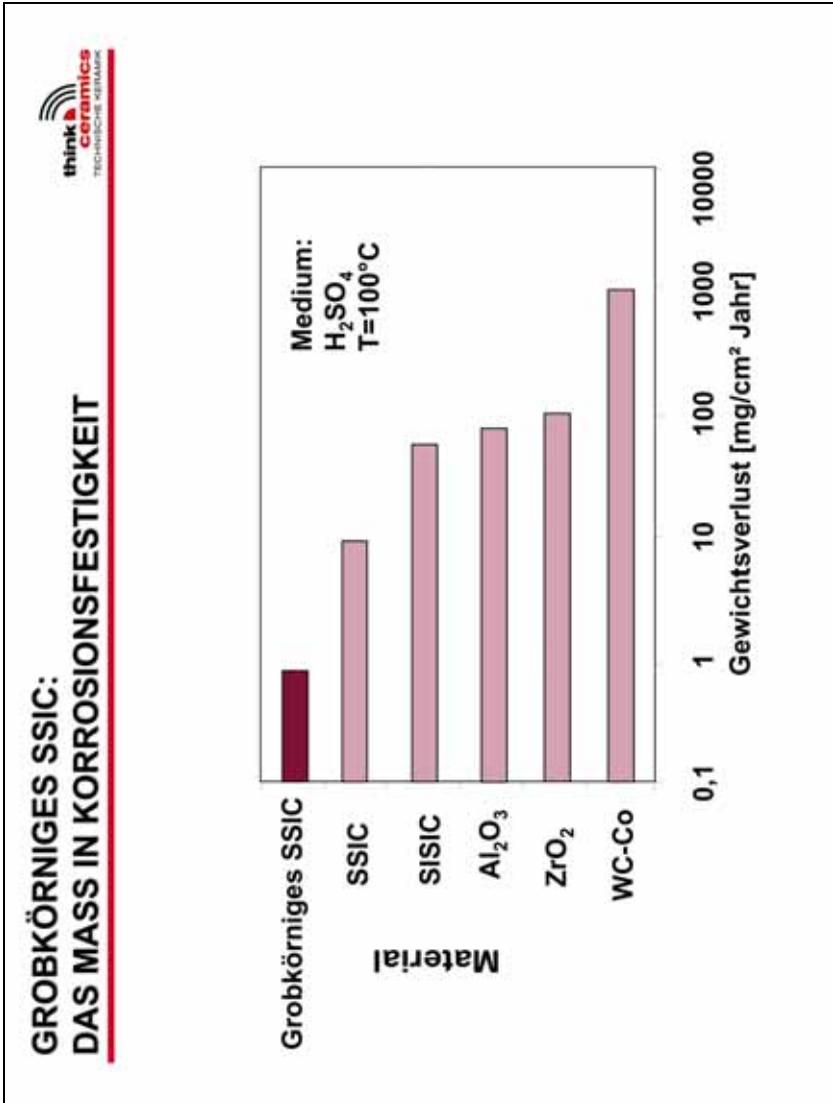
Dichte:
> 97 %



0 400 μm

The image shows a scanning electron micrograph (SEM) of a SiC microstructure. The micrograph displays a dense, interlocking network of elongated, needle-like or plate-like crystals. The crystals vary in length and orientation, creating a complex, fibrous appearance. A scale bar in the bottom right corner of the micrograph indicates a length of 400 micrometers.

4.4. SiC-Anwendungen - Folie 20



4.4. SiC-Anwendungen - Folie 21

GROBKÖRNIGES SSIC:

VERBESSERUNG DER KORROSIONSFESTIGKEIT



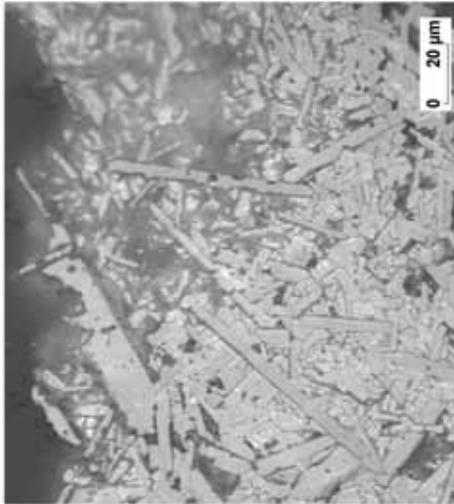
SSIC



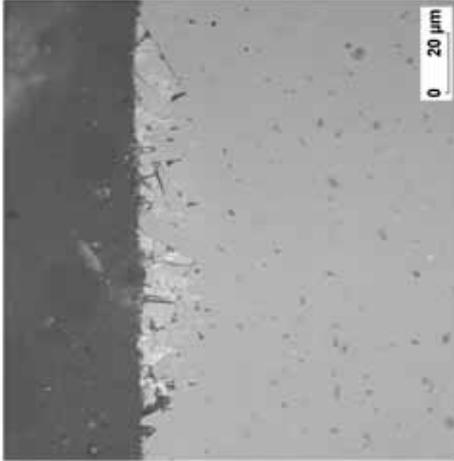
Grobkörniges SSIC

Axial-/Radial-Lager 3 Monate in
NaCl Lauge, 24% bei 95°C

**GROBKÖRNI GES SSIC:
DAS MASS IN KORROSIONSFESTIGKEIT**

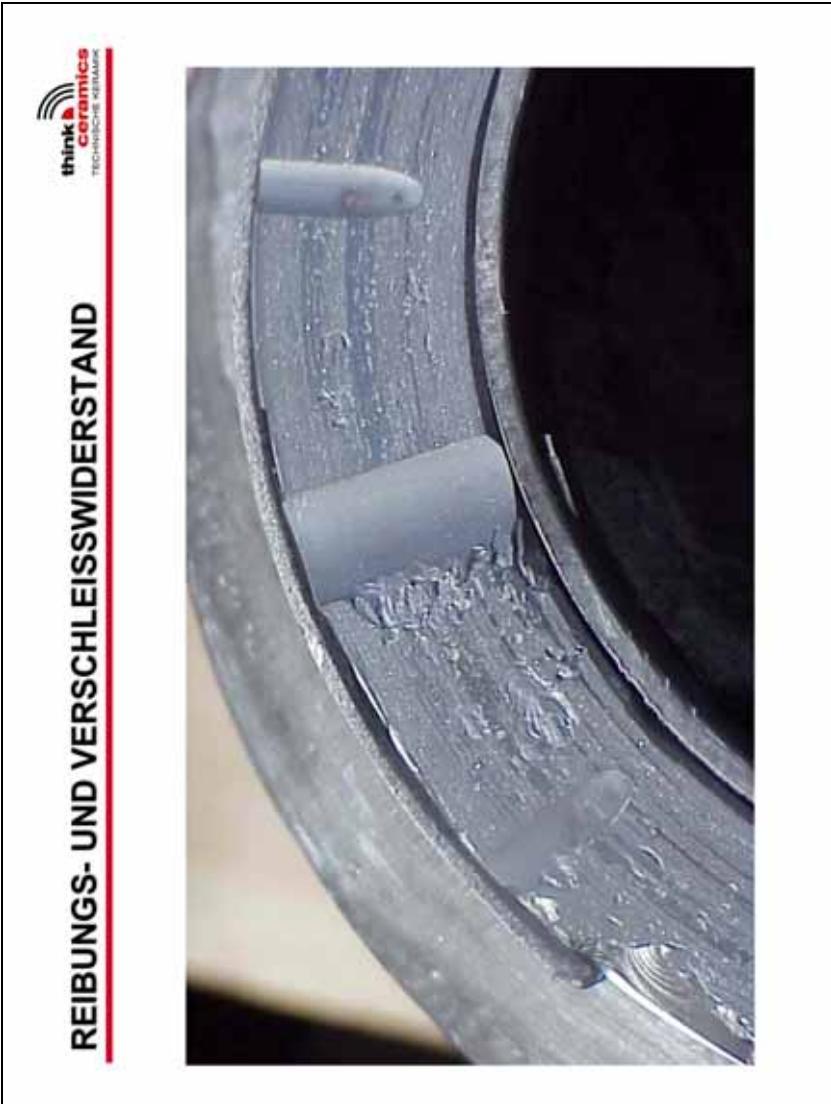


SSIC

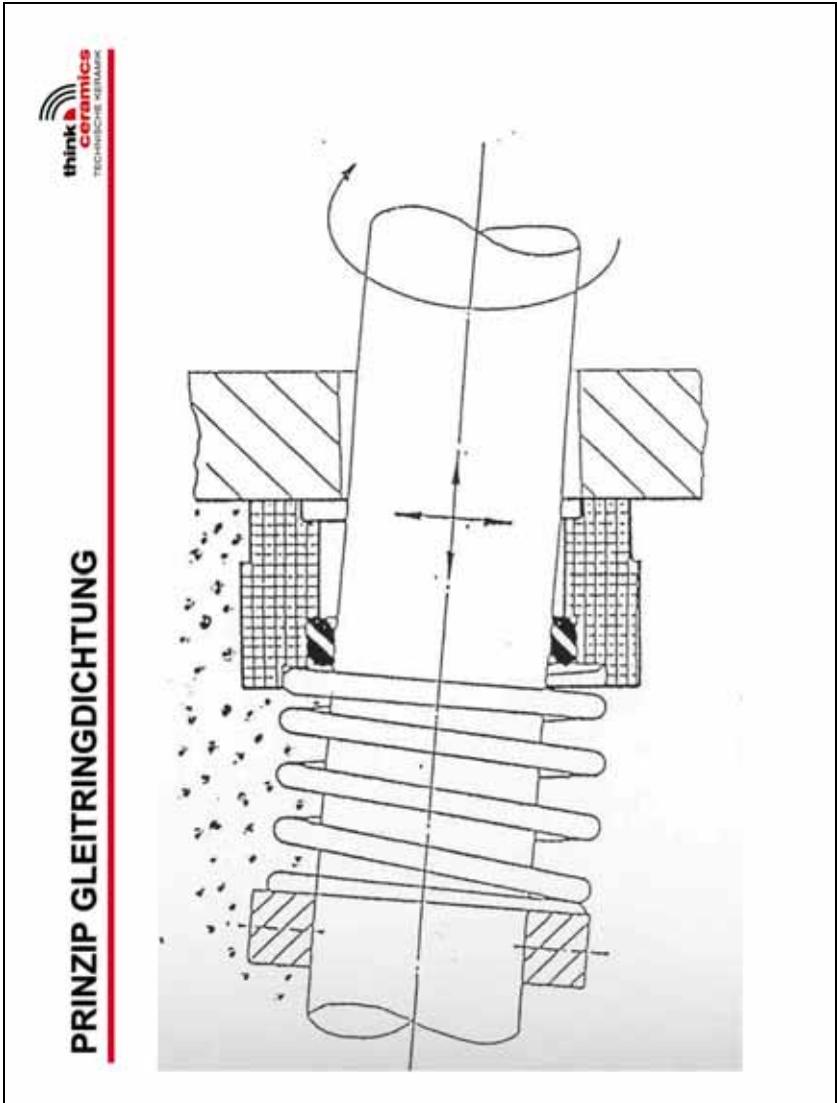


Grobkörniges SSIC

Axial-/Radial-Lager 3 Monate in
NaCl Lauge, 24% bei 95°C



4.4. SiC-Anwendungen - Folie 24



4.4. SiC-Anwendungen - Folie 25

DIE KONVENTIONELLE SILICIUMCARBID ANWENDUNG - DIE GLEITRINGDICHTUNG



Überwiegend kommen hart/weich Dichtungspaarungen zum Einsatz

Siliciumcarbide-Ring läuft gegen Kohle-Ring

- **Siliciumcarbide liefert**
 - Hohe Korrosionsbeständigkeit
 - Geringe Dichte
 - Hohe Festigkeit
 - Exzellente Verschleißfestigkeit
 - Sehr hohe Wärmeleitfähigkeit
 - Geringen thermischen Verzug
- **Kohle liefert**
 - Hohe Korrosionsbeständigkeit
 - Geringe Dichte
 - Exzellente Trockenlaufähigkeit
- **Herausforderung**
 - Trockenlaufähigkeit
- **Problem**
 - Verschleißrate
 - Festigkeit

DIE HERAUSFORDERUNG

Hoch belastete Dichtungen müssen hohen Drücken und Geschwindigkeiten (pv-Werte) widerstehen

Für hohe pv-Werte werden benötigt

- Hohe Verschleissfestigkeit
- Hohe Steifigkeit
- Geringer thermischer Verzug
- ✗ Gutes Gleitverhalten unter Mischreibungsbedingungen

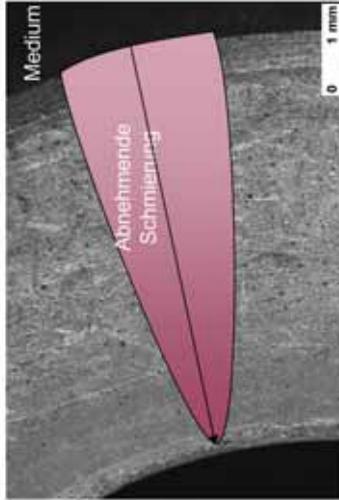
Siliciumcarbid ist eingepaart ideal geeignet für den Einsatz in hoch belasteten Dichtungen.

Optimierung des Gleitverhaltens unter Mangelschmierung.

SCHMIERUNGSBEDINGUNGEN TRIBOLOGISCH BELASTETER DICHTUNGEN



Je nach Belastung stellen sich über dem Dichtflächenquerschnitt Bereiche mit Mangelschmierung ein.

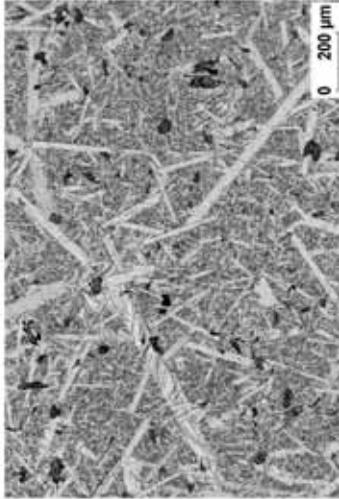


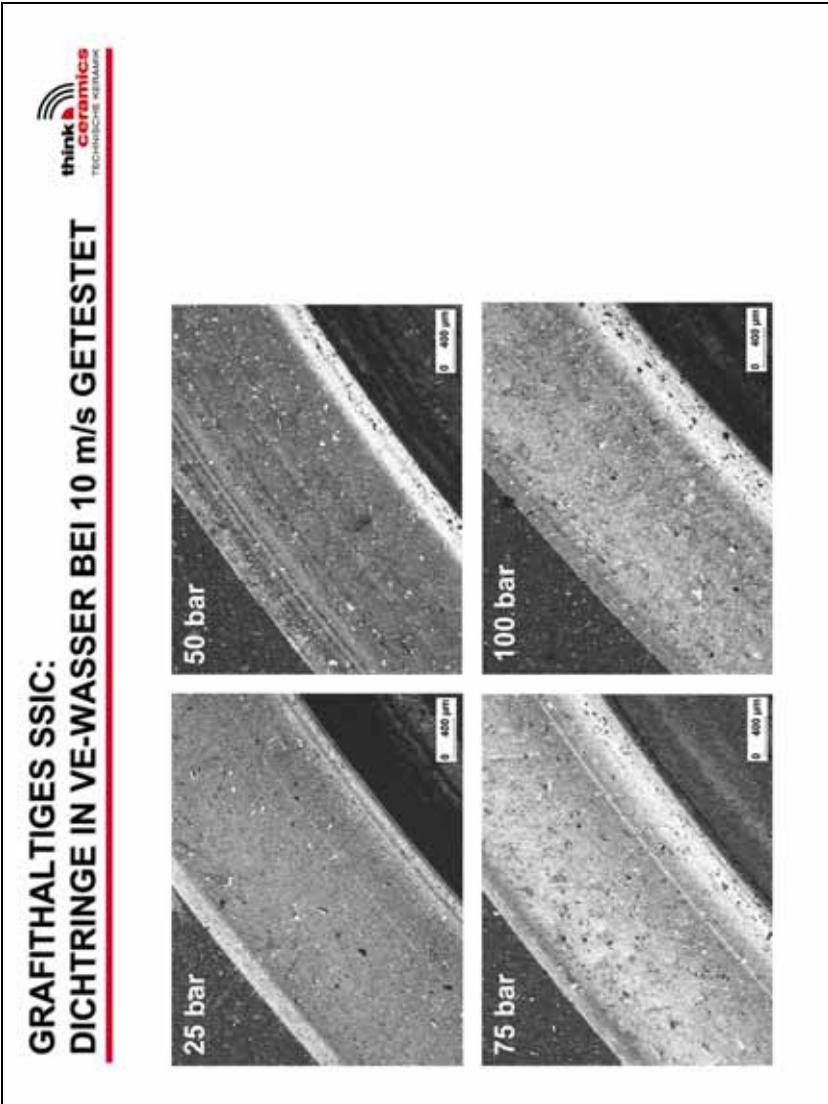
GEFÜGE: GRAFITHALTIGES SSIC



Grobe Gefügestruktur mit gebundenen Grafitpartikeln erlaubt:

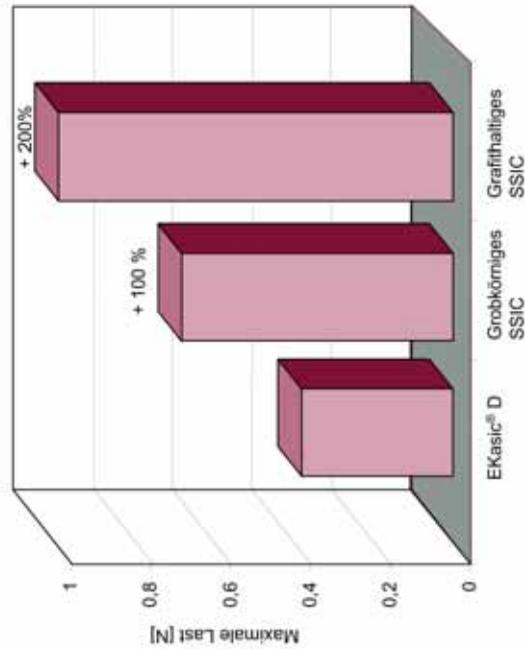
- exzellentes Gleitverhalten unter Mangelschmierung
- zeitweisen Trockenlauf
- beste Korrosionsbeständigkeit
- verbesserte Tragfähigkeit



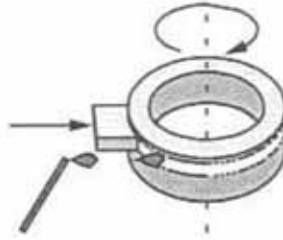


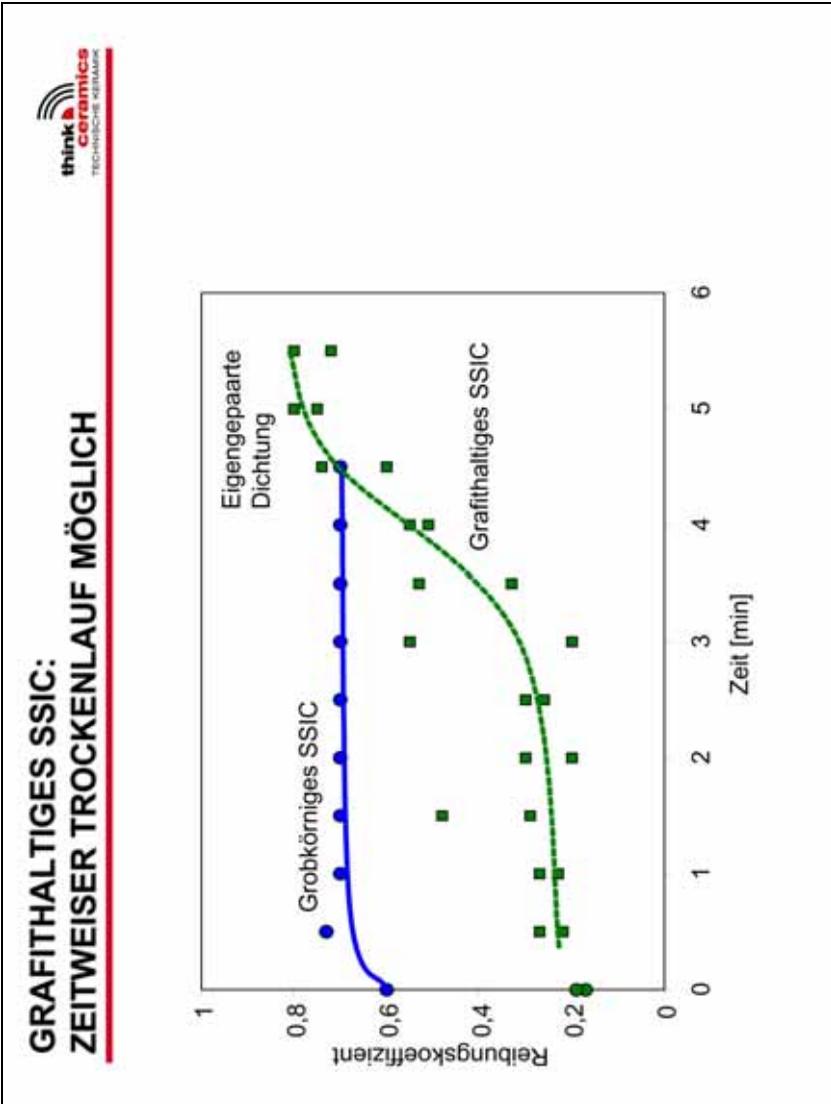
4.4. SiC-Anwendungen - Folie 30

GRAFITHALTIGES SSiC: EXZELLENTES TRAGVERHALTEN

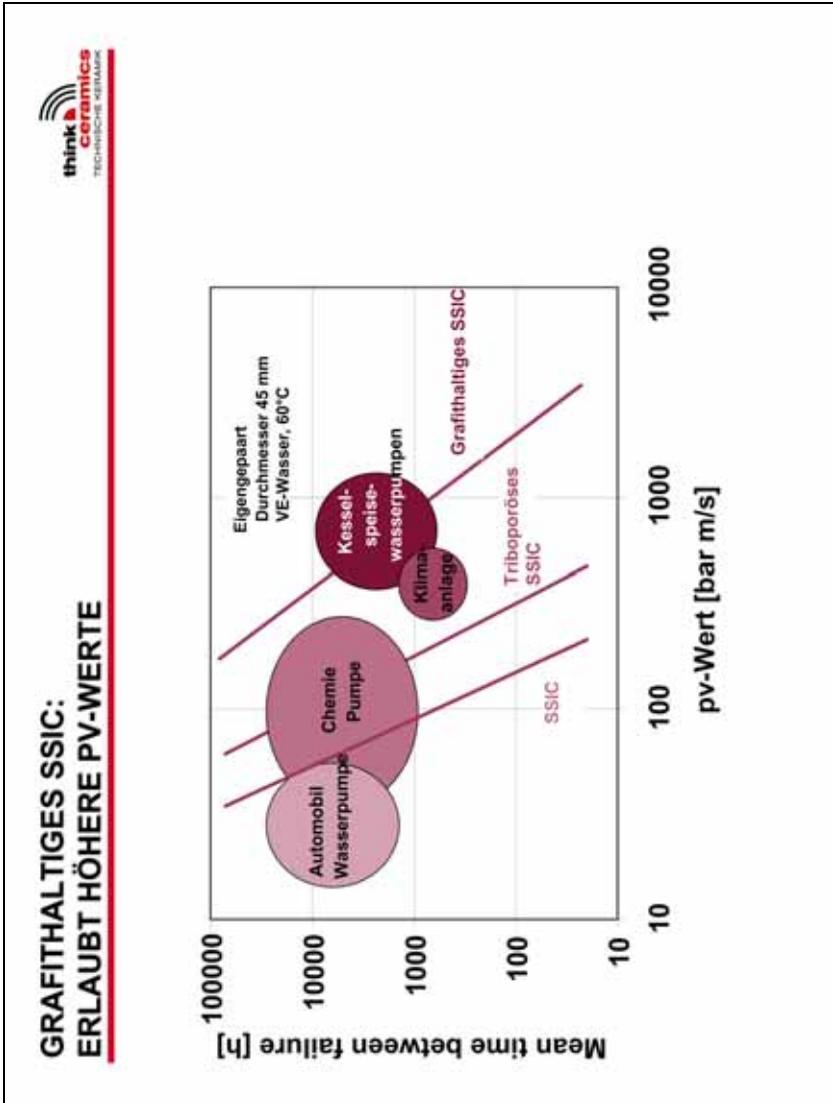


VE- Wasser
20°C.
Kraft wird kontinuierlich
bis zum Stillstand erhöht





4.4. SiC-Anwendungen - Folie 32



4.4. SiC-Anwendungen - Folie 33