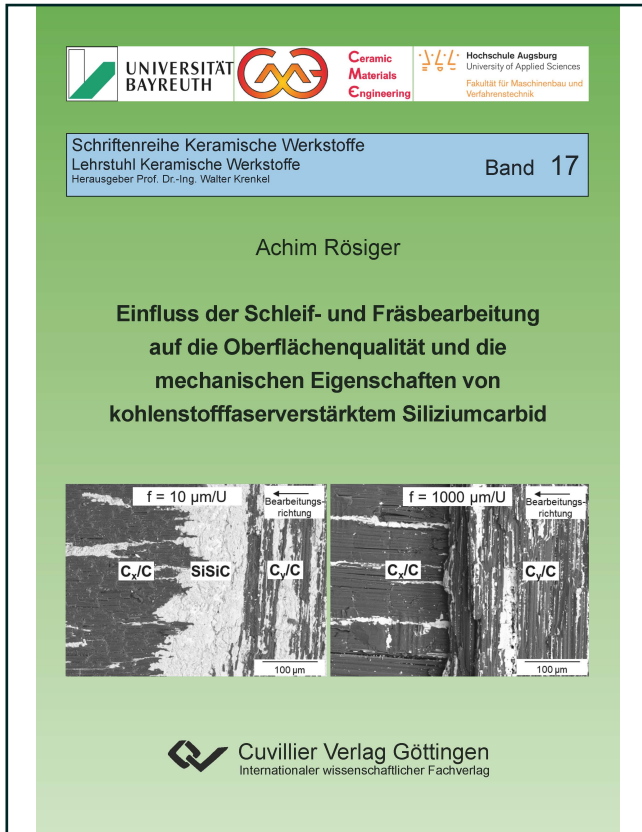




Achim Rösiger (Autor)

# **Einfluss der Schleif- und Fräsbearbeitung auf die Oberflächenqualität und die mechanischen Eigenschaften von kohlenstofffaserverstärktem Siliziumcarbid**



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/8732>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

# 1. Einleitung und Zielsetzung

## 1.1 Einleitung

Aufgrund ihres einzigartigen Eigenschaftsprofils werden Bauteile aus technischen Keramiken in vielen Bereichen eingesetzt. Dabei können die Anwendungsgebiete Reibung und Verschleiß, Chemie und Anlagenbau sowie die Hochtemperatur-Prozesstechnik besonders hervorgehoben werden [1–3]. Produkte aus monolithischen Keramiken wie Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Siliziumnitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) und Siliziumcarbid ( $\text{SiC}$ ) sind durch ihre hohe Härte, Steifigkeit und Korrosionsbeständigkeit einerseits verschleißbeständig und besitzen andererseits eine herausragende Hochtemperaturfestigkeit. Diese Eigenschaften können von polymeren oder metallischen Werkstoffen nicht erreicht werden. Allerdings lassen die geringe Bruchzähigkeit und das daraus resultierende Spröbruchverhalten den Einsatz monolithischer Keramiken in sicherheitsrelevanten Bereichen meist nicht zu. Aufgrund der hohen Kerbempfindlichkeit monolithischer Keramiken führen bereits kleinste Defekte wie Inhomogenitäten, Poren oder Mikrorisse, im Gegensatz zu Polymeren und Metallen, vor allem unter Zugbelastung zur Minderung der Bauteilfestigkeit.

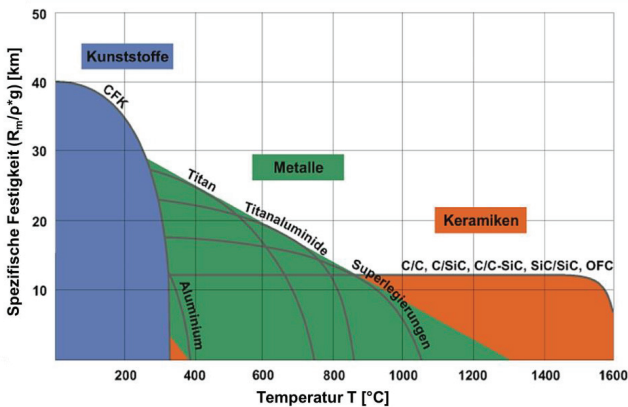
Eine Brücke schlagen dabei die keramischen Verbundwerkstoffe bzw. die Ceramic Matrix Composites (CMC). Durch das Einbetten von keramischen Fasern oder Kohlenstofffasern in eine keramische Matrix wird ein schadentolerantes Bruchverhalten erzeugt, obwohl die Faser- und Matrixbestandteile des Verbundwerkstoffes inhärent spröde sind. Das quasi duktile Bruchverhalten der beiden spröden Komponenten wird durch die Faser/Matrix-Anbindung bestimmt und meist über eine Faserbeschichtung eingestellt. Keramische Faserverbundwerkstoffe kombinieren das thermomechanische Eigenschaftsprofil keramischer Werkstoffe wie Hochtemperaturfestigkeit sowie eine hohe korrosive und tribologische Verschleißbeständigkeit mit einer gesteigerten Bruchzähigkeit und einem schadentoleranten Bruchverhalten. Wegen der, im Vergleich zu monolithischen Keramiken, deutlich gesteigerten Thermoschockbeständigkeit und der geringen Dichte der keramischen Faser- und Matrixwerkstoffe eignen sich CMCs sehr gut als Leichtbauwerkstoffe für Hochtemperaturanwendungen mit hohen Heiz- und Abkühlraten.

Das Einsatzpotential nichtoxidischer Faserverbundkeramiken für Leichtbauanwendungen im Hochtemperaturbereich geht aus Abbildung 1 deutlich hervor. In dem Diagramm werden die massenspezifischen Festigkeiten im Vergleich zu anderen Konstruktionswerkstoffen in Abhängigkeit von der Einsatztemperatur aufgetragen. Bei Raumtemperatur besitzen kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) die höchste spezifische Festigkeit, was an der geringen Dichte der Faser- und Matrixkomponenten und der hohen Festigkeit der Kohlenstofffaser liegt. Oberhalb von 200 °C führt die

geringe thermische Beständigkeit der polymeren Matrix jedoch zum starken Festigkeitsabfall.

Bei sehr hohen Einsatztemperaturen von bis zu 1100 °C und hoher mechanischer Beanspruchung werden Komponenten aus metallischen Hochleistungswerkstoffen wie Titanaluminide oder Superlegierungen z. B. auf Nickelbasis eingesetzt. Als Beispiel hierfür können Komponenten im sogenannten „heißen Bereich“ von Fluggasturbinen genannt werden [4,5]. Allerdings ist der Einsatz metallischer Werkstoffe bei wesentlich höheren Temperaturen aufgrund abfallender Festigkeit, Steifigkeit und Kriechbeständigkeit knapp unterhalb des Schmelzpunktes nicht möglich.

Nichtoxidische CMCs besitzen selbst oberhalb von 1100 °C ein weitestgehend temperaturunabhängiges Leichtbaupotential und können unter bestimmten Voraussetzungen bei Temperaturen von bis zu 1500 °C eingesetzt werden. Daher werden CMC-Strukturen in Zukunft eine zentrale Rolle bei der Bereitstellung effizienter Flugantriebe mit stark reduzierten Emissionen durch gesteigerte Betriebstemperaturen einnehmen [6–10].



**Abbildung 1: Einfluss der Temperatur auf die spezifische Festigkeit unterschiedlicher Werkstoffe,  $R_m$ : Festigkeit,  $\rho$ : Rohdichte,  $g$ : Normalbeschleunigung [2].**

Die an Komponenten aus Faserverbundkeramik gestellten Anforderungen wie hohe Maß-, Form-, Lagegenauigkeit und Oberflächengüte können im Allgemeinen durch die endkonturnahe Herstellung nicht erreicht werden. Um die endgültige Bauteilgeometrie herzustellen und Unregelmäßigkeiten an der Werkstoffoberfläche wie z. B. Siliziumablagerungen abzutragen, werden die Oberflächen der CMC-Rohbauteile bearbeitet.

Die Bearbeitungsprozesse der CMCs sind ähnlich aufwändig wie die der monolithischen Keramiken. Daher bilden auch von Anwendungen der monolithischen Keramiken abgeleitete Schleifverfahren den aktuellen Stand der Technik bei der Bearbeitung von Faserverbundkeramiken. Die im Anwendungsfall erwünschten Werkstoffeigenschaften

wie hohe Härte, Verschleißfestigkeit und hohe Schmelz- und Zersetzungstemperaturen der Faser- und Matrixbestandteile führen zu großen Herausforderungen bei der Bearbeitung. Daraus resultieren der Bedarf teurer Diamantwerkzeuge und eine ausreichende Wärmeabfuhr während der Bearbeitung. Die Bearbeitung von Komponenten aus Faserverbundkeramik macht selbst bei größeren Produktserien wie beispielsweise der Keramikbremsscheibe für PKW etwa 25 % der Gesamtherstellungskosten aus [11]. Hinzu kommt das finanzielle Risiko eines Bauteilausschusses in einem der letzten Prozessschritte, da eine Beschädigung durch fehlerhafte Bearbeitung nicht ausgebessert werden kann. Aus den genannten Gründen nimmt die Vermeidung von Bearbeitungsschäden einen wichtigen Stellenwert bei der wirtschaftlichen Fertigung von CMC-Komponenten ein.

## 1.2 Problemstellung

Das im Rahmen der Arbeit untersuchte Werkstoffsystem ist ein kohlenstofffaserverstärktes Siliziumcarbid (C/C-SiC), welches im Flüssigsilizierverfahren hergestellt wird. Als bekannteste Anwendung aus diesem Werkstoff kann die keramische Hochleistungsbremse für PKW genannt werden, auch wenn diese kurzfaserverstärkt ist. Gewöhnlich erfolgt die Bearbeitung der Bremsscheiben-Rohlinge durch Flachsleifprozesse mit Schleifscheiben. Die großen Werkzeugdurchmesser der Schleifscheiben erlauben Prozesse mit hohen Schnittgeschwindigkeiten (Rotation). Dadurch lassen sich auch höhere Vorschubgeschwindigkeiten (Translation) realisieren, wodurch akzeptable Zerspanungsleistungen erreicht werden.

Flachsleifverfahren sind aber auch mit Nachteilen für den Bearbeitungsprozess behaftet. Das betrifft insbesondere die Einschränkungen bei den bearbeitbaren Bauteilgeometrien. Die Werkzeug- und Maschinentechologie ist bei der Flachsleifbearbeitung in erster Linie auf die Planbearbeitung ebener Flächen abgestimmt. Die Bearbeitung räumlicher und sphärischer Formen mit engen Radien, wie beispielsweise bei CMC-Turbinenstrukturen (z.B. Leitschaufeln), erfordert andere Bearbeitungsstrategien.

Des Weiteren führt die von Reib- und Verformungseffekten dominierte Energieumsetzung bei Schleifprozessen zu einer hohen thermischen Belastung von Werkzeug und -stück. Auch wenn während des Prozesses Kühlmittel zugegeben wird, ist die Kühlleistung begrenzt und es muss bei weiterer Erhöhung der beiden Prozessgeschwindigkeiten mit einem höheren thermischen Werkzeugverschleiß gerechnet werden. Beim Schleifen wird die mechanische Belastbarkeit der einzelnen Kornschnitten durch die Korngröße und die weichere Bindungskomponente bestimmt, was nur sehr kleine Einzelspannungsdicken zulässt und somit zu einer zusätzlichen Begrenzung der Vorschubgeschwindigkeit führt. Ein weiterer negativer Aspekt der Schleifbearbeitung besteht darin, dass die kinematischen und geometrischen Kenngrößen der Kornschnitten lediglich statistisch beschrieben werden können und keine direkte Beziehung zu den Prozesskenngrößen (Bearbeitungskräfte und -temperaturen) herge-

stellt werden kann. Die genannten Probleme, die mit der Flachsleifbearbeitung von C/C-SiC verbunden sind, können zum einen durch geänderte Werkzeuggeometrien, zum anderen durch die Anwendung eines anderen Bearbeitungsverfahrens gelöst werden.

Dies ist mit großen Herausforderungen verbunden, da eine Vergleichbarkeit mit dem neuen Bearbeitungsverfahren hergestellt werden muss, obwohl selbst die grundlegenden Bearbeitungsmechanismen und deren Zusammenhänge mit der Bearbeitungsqualität für Faserverbundkeramiken wie C/C-SiC noch nicht vollständig verstanden sind. Zudem ist unbekannt, ob der Bearbeitungsprozess, wie es bei monolithischen Keramiken der Fall ist, Auswirkungen auf die Bauteilfestigkeit haben kann.

### **1.3 Zielsetzung**

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung der Auswirkungen der Schleif- und Fräsbearbeitung mit Schaftwerkzeugen auf die Oberflächenqualität und die mechanischen Eigenschaften von C/C-SiC. Das umfasst insbesondere die Schaffung vergleichbarer Bedingungen für die Schleif- und Fräsbearbeitung, die Untersuchung der Einflussgrößen auf die Bearbeitungskräfte und -temperaturen sowie die Evaluation der gefertigten Oberflächen und der Festigkeit nach der Bearbeitung für einen 2D-gewebeverstärkten C/C-SiC-Werkstoff. Dabei soll auch der Einfluss der Bearbeitungsebene parallel oder senkrecht zum Lagenaufbau untersucht werden.

Durch die vergleichbaren und somit übertragbaren Bearbeitungsbedingungen beim Schleifen und Fräsen mit Schaftwerkzeugen soll das Potential der neuen Fräsprozesse für die Bearbeitung von C/C-SiC-Werkstoffen aufgezeigt werden. Dazu gehört im Wesentlichen das Beleuchten von Unterschieden bei Prozessgeschwindigkeit (Leistungsfähigkeit), Bearbeitungskraft und -temperatur sowie resultierender Oberflächenqualität und Festigkeit durch den Wechsel des Bearbeitungsverfahrens mit entsprechenden Werkzeugen.

Die Untersuchung der Oberflächenqualität findet zum einen qualitativ auf mikrostruktureller Werkstoffebene zur Bestimmung der Bearbeitungsmechanismen, zum anderen quantitativ anhand der Rauheit zur Bewertung der Bearbeitungsgenauigkeit statt.

Für eine bessere Erläuterung der Bearbeitungsergebnisse der C/C-SiC-Verbundwerkstoffe sollen, anhand von Analogieversuchen, die Abtragmechanismen der einzelnen Komponenten innerhalb der Werkstoffarchitektur untersucht werden.

### **1.4 Vorgehensweise**

Anhand von Analogieversuchen mit Ritzdiamanten werden die Einflüsse der einzelnen Komponenten auf die Abtragmechanismen des C/C-SiC-Werkstoffverbundes untersucht. Die Ritztiefe ist eine Konstante und wird dabei so eingestellt, dass der Ritzdiamant nacheinander durch die einzelnen Werkstoffbereiche bewegt wird. Auf

Basis der Ritzkräfte und der Ritzspuren können quantitative und qualitative Aussagen zum Abtragverhalten auf Mikrostrukturebene getroffen werden, welche als Grundlage zur Bewertung der Schleif- und Fräsergebnisse dienen.

Die Untersuchung der Bearbeitung mit Schaftwerkzeugen begründet sich einerseits in dem künftigen Bedarf komplex geformte CMC-Strukturen mit engen Radien bearbeiten zu können und andererseits damit, dass mit Schleif- und Fräswerkzeugen unter gleichen Bedingungen auf einer Bearbeitungsmaschine prozessiert werden kann. Die Bearbeitungsexperimente werden an einem flüssigsilizierten C/C-SiC-Werkstoff mit 2D-Gewebeverstärkung durchgeführt. Aufgrund der hohen Härte der Siliziumcarbidmatrix wird Diamant als Schneidstoff für die Schleif- und Fräswerkzeuge eingesetzt. Zunächst erfolgt, auf Basis der Literaturrecherche zum Stand der Technik, die Definition der Versuchsmatrix für die Prozessgrößen (z. B. Prozessgeschwindigkeiten) zum Schleifen. Die Erprobung der Fräsbearbeitung findet bei gleichen Prozesseinstellungen statt, wobei der Betriebsbereich durch die Realisierbarkeit höherer Vorschübe erweitert wird.

Zunächst werden die Einflussfaktoren auf die Prozesskenngrößen untersucht. Die Bearbeitungskräfte stellen eine Messgröße zur Bestimmung der mechanischen Belastung dar, der der C/C-SiC Werkstoff und das Werkzeug während des Bearbeitungsprozesses ausgesetzt sind. Analog dazu wird anhand der Bearbeitungstemperatur auf die jeweilige thermische Belastung geschlossen. Durch die Erkenntnisse sollen die Einflussfaktoren mit den größten Auswirkungen auf die Belastungszustände identifiziert und Belastungsgrenzen, die zu einem instabilen Prozesszustand, aufgrund von beispielsweise starkem Werkzeugverschleiß, führen, erkannt werden.

Die Bewertung der Bearbeitungsqualität des C/C-SiC-Werkstoffes erfolgt anhand von Aufnahmen der Mikrostruktur und Rauheitsmessungen. Dabei sind Bearbeitungsprozesse vorzuziehen, die einen möglichst geringen Schädigungsgrad der Mikrostruktur des C/C-SiC-Werkstoffes aufweisen. Die Verknüpfung mit den Ergebnissen aus den Analogieversuchen und den Untersuchungen zu den Prozesskenngrößen stellt den Zusammenhang zwischen Abtragmechanismen und erzielbaren Bearbeitungsqualitäten her. Ein quantitativer Vergleich der Oberflächenqualitäten wird durch eine Flächenrauheitsmessung der bearbeiteten Werkstücke realisiert. Als Zielgröße werden Rauheitswerte aus einem typischen Anwendungsbereich wie beispielsweise der PKW-Keramikkremsscheibe angestrebt. Durch eine mechanische Prüfung wird der Einfluss der größten, im Rahmen dieser Arbeit, auftretenden Schädigungen der Oberfläche und der oberflächennahen Randzone charakterisiert. Sowohl bei der Bearbeitungsqualität als auch bei der mechanischen Prüfung wird der Einfluss der Bearbeitung in der Ebene parallel (In-plane) oder senkrecht (Out-of-plane) zum Lagenaufbau des C/C-SiC-Werkstoffes untersucht.

Die abschließende Evaluation geeigneter Schleif- und Fräsprozesse und das Aufzeigen der Prozessgrenzen erfolgt anhand der Abtragleistung, der im Anwendungsfall geforderten Oberflächenqualität und der Vermeidung einer Reduktion der Werkstofffestigkeit.

## 2. Stand der Technik

### 2.1 Keramische Faserverbundwerkstoffe

#### 2.1.1 Bruchverhalten von keramischen Verbundwerkstoffen

Faserverstärkte Verbundwerkstoffe werden in drei Kategorien eingeteilt. Bei polymeren und metallischen Verbundwerkstoffen (Polymer Matrix Composites bzw. Metal Matrix Composites) führt die Faserverstärkung zur Erhöhung der Festigkeit, da der Elastizitätsmodul (E-Modul) der eingesetzten Fasern deutlich größer ist als der der Matrices. Bei den keramischen Verbundwerkstoffen wird indessen durch das Einbetten der Fasern ein schadentolerantes Bruchverhalten erzeugt. Dies wird durch den Verbund von Fasern und Matrices mit Elastizitätsmodul im gleichen Größenbereich erreicht. Da allerdings sowohl die Matrix als auch die Faserkomponente spröde sind, wird die Duktilisierung durch das Design des Verbundwerkstoffes eingestellt.

Faserverstärkte keramische Verbundwerkstoffe zeichnen sich, im Gegensatz zu monolithischen Keramiken, durch ein ausgeprägtes, pseudoplastisches Verhalten aus. Dieses Werkstoffverhalten geht im Zugversuch (Abbildung 2) mit einer deutlich größeren Bruchdehnung und einer Restfestigkeit nach dem Versagen einher. Die damit verbundenen Mechanismen der Energieabsorption und der Lastverteilung werden in Abbildung 3 nach A. Evans et al. [2] veranschaulicht.

Der erste Bereich der Spannungs-Dehnungskurve ist durch einen linear-elastischen Verlauf gekennzeichnet. Wenn die Elastizitätsgrenze überschritten wird, folgt ein nicht-linearer Bereich. Aufgrund der geringen Bruchdehnung bilden sich zunächst Risse in der Matrix. Diese können nur bis zur jeweils nächsten Faser ungehindert wachsen und werden durch die schwache Faser/Matrix-Anbindung in die Richtung parallel zu Grenzfläche und Faserachse umgelenkt. Folglich löst sich die Faser von der Matrix (fibre debonding) durch Energieabsorption, was zum Anstieg der Bruchspannung und einer Erhöhung der Bruchdehnung führt. Bei weiterer Zunahme der Beanspruchung überbrücken die Fasern die Risse in der Matrix (fibre bridging), indem sie zusätzlich die auftretenden Spannungen der Matrix aufnehmen und über die Rissflanken wieder in diese zurückführen. Aufgrund dieser Rissüberbrückung steigt die Spannung weiter, solange die Fasern noch Last aufnehmen können. Wird die maximale Einzelfaserzugfestigkeit erreicht, versagt das Faserfilament aufgrund lokaler Defekte in der Fasermorphologie (z. B. durch Durchmesserjüngung, Oberflächendefekt) und resultiert in einem weiteren Spannungsabbau im Composite. Der Faserbruch kann auch in Bereichen der intakten Matrix auftreten. Beim Überschreiten der Zugfestigkeit des Verbundwerkstoffes fällt die Spannung durch das Versagen ganzer Faserbündel ab. Die Faserenden werden aus der Matrix herausgezogen (Faser-Pull-Out). Dabei wird nochmals Rissenergie abgebaut, da der Widerstand an der Faser/Matrix-Grenzfläche gegen das Herausziehen überwunden werden muss (Schubspannung). [12–14]

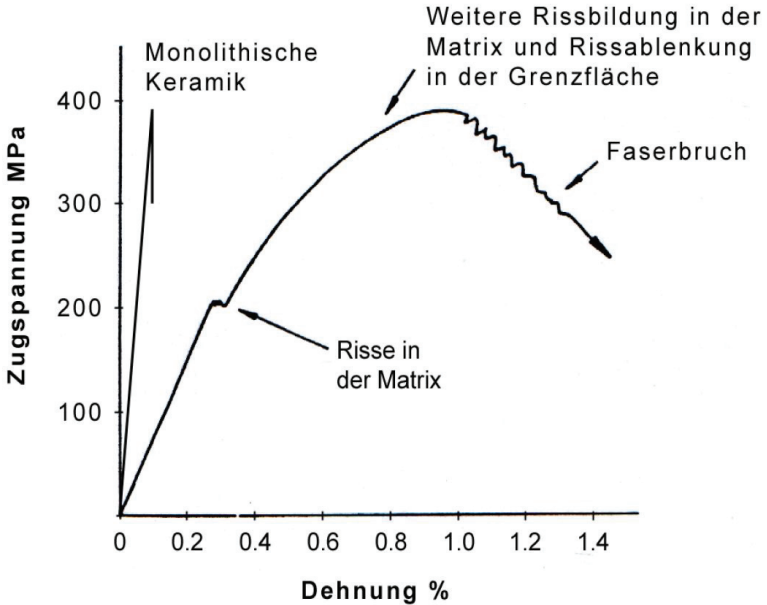


Abbildung 2: Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines keramischen Verbundwerkstoffs im Zugversuch nach [12].

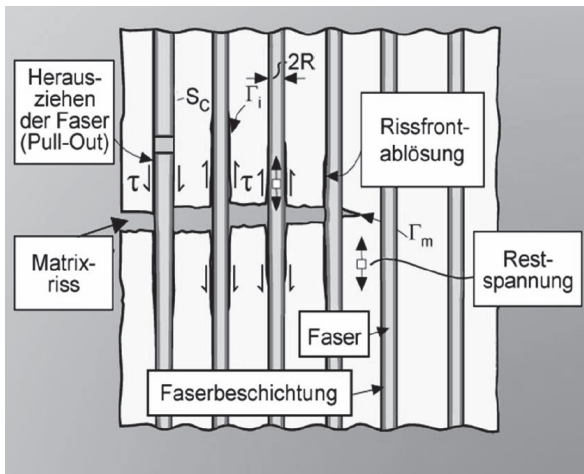


Abbildung 3: Mechanismen bei Überbeanspruchung der keramischen Faserverbundwerkstoffe nach [13].

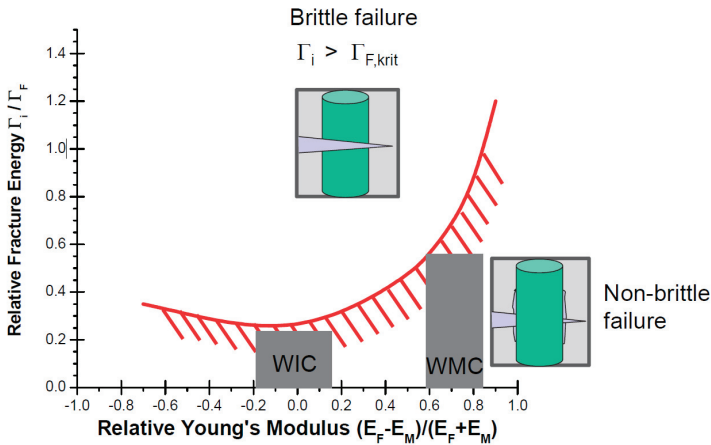


Dieses schadentolerante Verhalten durch Rissumlenkung und Rissüberbrückung erfordert eine mechanische Entkopplung von Faser und Matrix, was durch die Auslegung des Verbundwerkstoffes mit einer schwachen Komponente eingestellt wird. Hierbei werden zwei unterschiedliche Werkstoffkonzepte unterschieden:

- Verbundwerkstoffe mit schwacher Matrix, engl. Weak Matrix Composites (WMC)
- Verbundwerkstoffe mit schwacher Faser/Matrix-Grenzfläche, engl. Weak Interface Composites (WIC)

Bei WMCs beruht das pseudo-plastische Verhalten auf dem Design einer porösen Matrix. Der Kontaktanteil an der Faser/Matrix-Grenzfläche ist auf die Poren umschließenden Materialstege der Matrix reduziert. Dadurch kann sich bis zum Faserfilamentversagen ein Rissystem in der Matrix ausbilden und Spannung kann abgebaut werden. Das Weak-Matrix-Konzept ist vor allem bei den oxidischen Verbundwerkstoffen verbreitet. Bei den WICs wird die Funktionalität der Faser/Matrix-Grenzfläche durch eine Faserbeschichtung eingestellt. Dieser gesonderte Materialbereich (Interphase) wird als schwache Komponente des Verbundwerkstoffes konzipiert und ermöglicht unter Lasterhöhung eine Umlenkung der sich ausbreitenden Matrixrisse parallel zur Faserorientierung. Weak Interface Composites sind vor allem bei den nichtoxidischen Verbundwerkstoffen verbreitet. Die Fasern werden beispielsweise mit porösen Schichten und Schichten mit Spaltbruchverhalten parallel zur Faseroberfläche versehen. [15]

Abbildung 4 zeigt das Werkstoffverhalten der Rissablenkung für beide Werkstoffkonzepte, basierend auf dem theoretischen Modell von M. J. He und J. W. Hutchinson [16]. Bei WICs sind Faser- und Matrixmodul fast gleich groß (Abszissenwert gegen 0). Damit der Verbundwerkstoff ein schadentolerantes Verhalten durch Rissumlenkung aufweist, muss die Grenzflächen-Bruchenergie  $\Gamma_i$  geringer sein als die Faser-Bruchenergie  $\Gamma_F$  und das Verhältnis  $\Gamma_i/\Gamma_F$  darf den Grenzwert von 0,25 nicht überschreiten. Typische Vertreter sind Verbundwerkstoffe mit dichter Matrix und artgleichem Faserwerkstoff z. B. SiC/SiC mit pyrolytischer Kohlenstoffbeschichtung. Bedingt durch die Porosität weist die Matrix der WMCs im Vergleich zu den Fasern einen deutlich niedrigeren E-Modul auf. Eine schadentolerante Rissumlenkung ist daher auch bei höheren Verhältnissen der Bruchenergien  $\Gamma_i/\Gamma_F$  und sogar bei einer starken Faser/Matrix-Anbindung möglich. Als Beispiel kann hierbei ein oxidischer Verbundwerkstoff mit poröser  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Matrix und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Fasern genannt werden.



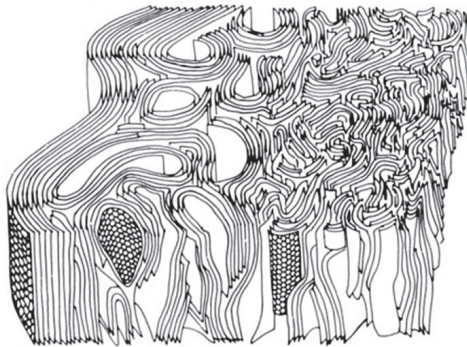
**Abbildung 4: Bruchverhalten in Abhängigkeit vom Verhältnis Grenzflächen-Bruchenergie  $\Gamma_i$  zu Faser-Bruchenergie  $\Gamma_F$  und dem Verhältnis der E-Moduln von Faser  $E_F$  und Matrix  $E_M$  nach [15].**

### 2.1.2 Kohlenstofffasern

Kohlenstofffasern sind kostengünstige Alternativen zu Keramikfasern und daher weit verbreitet als Verstärkungsfasern für faserverstärkte Keramiken. In inerter Atmosphäre können sie aufgrund der ausgezeichneten thermomechanischen Eigenschaften bei Temperaturen bis zu 2800 °C eingesetzt werden [17].

Ähnlich wie bei Graphitstrukturen bestehen Kohlenstofffasern aus übereinander angeordneten Graphitschichten, die jedoch keine ebene, sondern eine eher wellenförmige Gestalt aufweisen, welche als turbostratisch bezeichnet wird. Die Struktur und die Eigenschaften von Kohlenstofffasern hängen im Wesentlichen vom Precursorstyp sowie von der Maximaltemperatur und dem Verstreckungsgrad beim Herstellungsprozess ab. Ein Modell, das den Zusammenhang zwischen Struktur und Eigenschaften von Kohlenstofffasern basierend auf Polyacrylnitril (PAN)-Precursoren aufzeigt, wurde von Johnson vorgestellt (Abbildung 5) [18].

Die wellenförmigen Graphitebenen sind vorwiegend entlang der Faserrachse orientiert. Senkrecht dazu sind die Lagen unregelmäßig geschichtet und teilweise mäanderförmig ineinander gefaltet, wobei die Struktur zum Faserrand hin einen höheren Ordnungsgrad aufweist als im Faserkern [19]. Die gekrümmten Graphitebenen mit inhomogenen Bereichen und Defekten wie z. B. Mikroporen sind Merkmale für die turbostratische Struktur der PAN-basierten, hochfesten (engl. High Tenacity, HT) und hochmoduligen (engl. High Modulus, HM) Kohlenstofffaser.



**Abbildung 5: Dreidimensionales Modell der turbostratischen Struktur von Kohlenstofffasern auf PAN-Basis mit Inhomogenitäten und Defekten [18].**

Zur Herstellung von Kohlenstofffasern werden polymere Faserprecursoren pyrolysiert. Abbildung 6 gibt einen Überblick über die beiden bedeutendsten, kommerziellen Herstellungsprozesse, ausgehend von PAN- und Pech-Fasern.

Beim PAN-Prozess werden die Faserprecursoren zunächst unter Zugbelastung verstreckt und unter sauerstoffhaltiger Atmosphäre bei Temperaturen zwischen 200 und 300 °C stabilisiert. Hierbei findet eine Vernetzung der linearen PAN-Molekülketten zu einer thermisch belastbaren, zyklischen Struktur statt [20]. Die anschließende Pyrolyse in inerter Atmosphäre führt durch die Fortsetzung von Vernetzungs- und Ausrichtungsprozessen zu der Ausbildung von Kohlenstoff-Ringstrukturen. Dabei werden Stickstoff-, Wasserstoff- und Sauerstoffgruppen abgespalten. Abhängig von der maximalen Prozesstemperatur, die im Bereich zwischen 500 und 1500 °C liegt, weisen die Kohlenstofffasern amorphe oder turbostratische Strukturen auf. Zur Herstellung von Fasern mit sehr hohen E-Moduln ist ein weiterer Glühvorgang bei noch höher Temperatur von bis zu 3000 °C erforderlich [17]. Nach den Hochtemperaturprozessen wird insbesondere bei polymeren Verbundwerkstoffen die Faseroberfläche behandelt, um die Eigenschaften der mechanischen Kopplung der späteren Faser/Matrix-Grenzfläche einstellen zu können. Zum Schutz der Faseroberfläche während der Weiterverarbeitung in textilen Prozessen wird abschließend eine nanometerdünne Polymerschicht, die sogenannte Schlichte, aufgebracht.

Kohlenstofffasern, die ausgehend von Pechprecursoren hergestellt werden, weisen sehr hohe Moduln auf, da die Graphitebenen einen hohen Orientierungsgrad längs zur Faserachse haben. Allerdings ist die Festigkeit i. d. R. niedriger als die von Fasern auf PAN-Basis. Dies ist auf Defekte aufgrund von Verunreinigungen zurückzuführen [21]. Faserprecursoren aus Pechen werden üblicherweise mittels Schmelzspinnverfahren hergestellt. Wie bei der PAN-Route erfolgen nach der Stabilisierung in sauerstoffhaltiger Atmosphäre die Hochtemperaturschritte und die Oberflächenbehandlung.