

Hamburger Schriftenreihe
Produktentwicklung und Konstruktionstechnik

Technische Universität Hamburg-Harburg
Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik
Univ.-Prof. Dr.-Ing. D. Krause
Denickestraße 17
21073 Hamburg

Anna K. Usbeck

Auslegung von keramischen Strukturbauteilen unter mehraxialer statischer und zyklischer Beanspruchung

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im
Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Impressum

TuTech Verlag

TuTech Innovation GmbH
Harburger Schlosstr. 6-12
21079 Hamburg

Tel: +49 40 76629-0

Fax: +49 40 76629-6559

E-Mail: verlag@tutech.de

www.tutechverlag.de

Nachdruck, Vervielfältigung, Speicherung oder Übertragung in
elektronische, optische, chemische oder mechanische Datenhaltungs- oder
-verwertungssysteme sind – auch auszugsweise – ohne ausdrückliche
schriftliche Genehmigung von TuTech Innovation GmbH verboten.

Die Verwertung von Informationen aus der Hamburger Schriftenreihe
Produktentwicklung und Konstruktionstechnik zum Zweck der gewerblichen
Informationsvermittlung ist nicht zulässig.

Alle Rechte vorbehalten.

© TuTech Innovation GmbH

Hamburger Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionstechnik
ISSN 1868-6885

1. Auflage März 2013

ISBN 978-3-941492-57-8

Auslegung von keramischen Strukturbauteilen unter mehraxialer statischer und zyklischer Beanspruchung

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg-Harburg

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieurin (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von
Anna Kerstin Usbeck

aus
Bad Schwartau

2012

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dieter Krause

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers

Tag der mündlichen Prüfung: 17. Dezember 2012

Vorwort

Der konstruktive Umgang mit technischer Keramik war eine der ersten Herausforderungen, die sich mir während meines Berufslebens als Maschinenbauingenieurin stellten. Im Vordergrund meines damaligen Arbeitgebers stand die Ermittlung der tribologischen Grenzlasten von keramischen Gleitlagern. Schon damals stellte sich die Frage der mechanischen Auslegung solcher Bauteile.

Als ich im Jahr 2006 das Angebot bekam, ein DFG-Projekt zu übernehmen, bei dem systematisch keramische Strukturbauteile unter betriebsähnlichen Lasten untersucht werden sollten, nahm ich diese Herausforderung gerne an. Mein besonderer Dank gilt daher meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter Krause, für die Ermöglichung meiner Forschungsarbeit und die stete Ermutigung, die Erkenntnisse zu einer Dissertation auszubauen. Sein Rückhalt und das entgegengebrachte Vertrauen haben maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers, der sich als Leiter des Instituts für Produktentwicklung aus Karlsruhe (IPEK) viele Jahre in einem Sonderforschungsbereich mit keramischen Bauteilen beschäftigt hat, gilt mein herzlicher Dank für die Übernahme des Koreferats. Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. habil. Michael M. Morlock und Herrn Prof. Dr. Gerold Schneider für die zusätzliche Begutachtung.

Während der Promotionszeit wuchs neben meinen Forschungserkenntnissen auch die Anzahl der Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen am Institut. Es wurden viele konstruktive Workshops und interdisziplinäre Projekte durchgeführt. Ich möchte allen Kolleginnen und Kollegen, die mit mir die ersten Jahre des Instituts erleben und prägen durften, für die Zusammenarbeit herzlich danken. Allen voran unserem Oberingenieur Herrn Dr. Jens Schmidt. Ein besonderer Dank geht an die Kollegen Peter Peßler, Karsten Albers und Hans-Willhelm Mehrkens für die Unterstützung beim Neuaufbau und Betrieb des Prüfstandes.

Des Weiteren danke ich den Mitarbeitern des Instituts für Keramische Hochleistungswerkstoffe für die inhaltlichen Diskussionen, wie auch den Studentinnen und Studenten, die im Rahmen ihres Studiums Aufgabenstellungen von mir bearbeitet haben. Der Deutschen Forschungsgemeinschaft danke ich für die finanzielle Unterstützung.

Abschließend danke ich Frau Dr. Katja Engel für die kritische Durchsicht der Dissertationschrift und Frau Carolin Kademann für das graphische Auge. Ganz besonders danke ich jedoch meinem Mann Ibra Khoudia Ndiaye und meinen sehr eigenständigen Kindern Mame Saye und Momar Lissa.

Anna Kerstin Usbeck

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----------|
| <i>Nomenklatur</i> | V |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Ausgangssituation..... | 1 |
| 1.2 Problemstellung..... | 2 |
| 1.3 Zielsetzung der Arbeit..... | 3 |
| 2 Stand der Forschung | 5 |
| 2.1 Anwendung von Keramik im Maschinenbau | 5 |
| 2.1.1 Historie | 5 |
| 2.1.2 Mechanische Auslegung einzelner Komponenten..... | 14 |
| 2.1.3 Systematische Entwicklung keramischer Bauteile und Baugruppen | 16 |
| 2.2 Belastungen und Beanspruchungen | 17 |
| 2.2.1 Allgemeine Grundlagen des Festigkeitsnachweises | 20 |
| 2.2.2 Statischer Festigkeitsnachweis | 21 |
| 2.2.3 Bruchmechanische Grundlagen zum Rissfortschritt..... | 32 |
| 2.2.4 Ermüdungsfestigkeitsnachweis | 44 |
| 2.3 Konstruktive Auslegung von zyklisch beanspruchten Keramikbauteilen | 53 |
| 2.3.1 Wöhlerkurven versus Lebensdauerberechnung..... | 53 |
| 2.4 Abgeleiteter Forschungsbedarf | 54 |
| 2.4.1 Statische Festigkeitsauslegung von keramischen Bauteilen | 54 |
| 2.4.2 Ermüdungsfestigkeit..... | 55 |
| 2.4.3 Allgemeingültige Auslegungsvorschriften | 55 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3 | Ermittlung von Werkstoffkennwerten unter mehraxialer Beanspruchung..... | 57 |
| 3.1 | Versuchsstand zur mehraxialen Beanspruchungsanalyse..... | 58 |
| 3.1.1 | Probekörperwahl..... | 59 |
| 3.1.2 | Umsetzung des Prüfstandkonzeptes..... | 62 |
| 3.1.3 | Werkstoffauswahl..... | 66 |
| 3.2 | Statische Festigkeiten..... | 67 |
| 3.2.1 | Ergebnisse der Kurzzeitversuche Al_2O_3 , ZrO_2 und SiC | 67 |
| 3.2.2 | Ermittelte effektive Volumina und Oberflächen..... | 71 |
| 3.2.3 | Bewertung von mehraxialen Hauptnormalspannungen..... | 73 |
| 3.2.4 | Bruchbilder und Festigkeitshypothesen..... | 74 |
| 3.3 | Messungen zur Schwingfestigkeit..... | 76 |
| 3.3.1 | Ergebnisse der zyklischen Untersuchungen an Al_2O_3 | 76 |
| 3.3.2 | Ergebnisse der zyklischen Untersuchungen an SiC | 78 |
| 3.3.3 | Ermittlung der bruchmechanischen Parameter..... | 80 |
| 3.3.4 | Lebensdauerberechnung versus Wöhlerkennlinie..... | 82 |
| 3.3.5 | Zyklisches und statisches Risswachstum unterschiedlicher Keramikwerkstoffe..... | 84 |
| 3.4 | Bruchbilder der verschiedenen Beanspruchungsarten..... | 88 |
| 4 | Entwicklung einer konstruktionsgerechten neuen Auslegungsvorschrift..... | 91 |
| 4.1 | Dimensionieren nach statischer Festigkeit..... | 92 |
| 4.1.1 | Ermittlung der zulässigen Werkstoffspannung..... | 92 |
| 4.1.2 | Zulässige Werkstoffkennwerte..... | 94 |
| 4.1.3 | Berücksichtigung des mehraxialen Spannungszustands..... | 94 |
| 4.1.4 | Berücksichtigung der Bauteilgröße..... | 98 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.1.5 | Festigkeitsauslegung..... | 98 |
| 4.1.6 | Vergleich des Größeneinflussfaktors bei Metall und Keramik..... | 99 |
| 4.2 | Berücksichtigung des Langzeitverhaltens | 101 |
| 4.2.1 | Hypothesen | 101 |
| 4.2.2 | Bewertung des Größeneinfluss | 103 |
| 5 | Anwendungsbeispiele..... | 105 |
| 5.1 | Rohr mit Innendruck | 105 |
| 5.1.1 | Rohrfestigkeit nach neuer Auslegungsvorschrift | 106 |
| 5.1.2 | Numerische Ausfallwahrscheinlichkeit des Rohrs | 107 |
| 5.1.3 | Zeitfeste Auslegung des Rohrs..... | 108 |
| 5.1.4 | Vergleich der Ausfallwahrscheinlichkeiten..... | 108 |
| 5.1.5 | Vergleich der Lebensdauerprognose | 109 |
| 5.2 | Welle unter Torsion | 110 |
| 5.2.1 | Statische Wellenfestigkeit nach Auslegungsvorschrift | 111 |
| 5.2.2 | Numerische Ausfallwahrscheinlichkeit der Welle | 112 |
| 5.2.3 | Zeitfeste Auslegung der Welle..... | 112 |
| 5.2.4 | Vergleich der Berechnungsmethoden (tordierte Welle) | 113 |
| 5.3 | Verifizierung der Auslegungsregeln | 114 |
| 6 | Innovative Produktentwicklung mit keramischen Werkstoffen | 117 |
| 6.1 | Anforderungen für den Einsatz von keramischen Werkstoffen..... | 117 |
| 6.1.1 | Keramik in der systematischen Materialauswahl | 117 |
| 6.1.2 | Keramik im Konstruktionsprozess | 121 |
| 6.1.3 | Entwerfen mit keramischen Werkstoffen..... | 122 |
| 6.2 | Gestaltungsregeln für die Konstruktion mit keramischen Werkstoffen | 123 |

| | | |
|------------------|--|------------|
| 6.2.1 | Einfluss auf die rechnerische Ausfallwahrscheinlichkeit..... | 123 |
| 6.2.2 | Einfluss auf die optimale Werkstoffqualität | 127 |
| 6.2.3 | Einfluss auf Fertigung und Kosten..... | 127 |
| 6.3 | Beispiele für eine keramikgerechte Produktgestaltung | 128 |
| 6.3.1 | Radialgleitlager in der Pumpenanwendung | 129 |
| 6.3.2 | Zylinder-Kolben-Baugruppe eines Stirlingmotors | 135 |
| 6.3.3 | Abgeleitetes konstruktives Vorgehen | 147 |
| 7 | Zusammenfassung und Ausblick..... | 149 |
| 7.1 | Zusammenfassung der Untersuchungen | 149 |
| 7.2 | Ausblick auf zukünftige Forschungsaktivitäten | 151 |
| Anhang | | 153 |
| A1 | Tabellarische Messergebnisse..... | 153 |
| A2 | Auslegungsvorschrift..... | 171 |
| Literatur | | 177 |

Nomenklatur

Formelzeichen

| | | |
|-------------------|--|---------------|
| a | Risslänge | mm |
| a_c | Kritische Risslänge | mm |
| A | Risskonstante für zeitl. abhängiges Risswachstum | - |
| A^* | Normierte Risskonstante für zeitl. abhängiges Risswachstum | - |
| b | Breite | mm |
| B | Bruchmechanische Werkstoffeigenschaft | mm |
| C | Risskonstante für zyklisches Risswachstum | - |
| d_{eff} | Effektiver Durchmesser des Bauteils | mm |
| d | Durchmesser | mm |
| f_σ | Druckfestigkeitsfaktor | - |
| F | Kraft | N |
| h | Höhe | mm |
| I_V | Versagensintegral für Volumenfehler | - |
| I_S | Versagensintegral für Flächenfehler | - |
| $K_{I,c}$ | kritischer Spannungsintensitätsfaktor (Bruch) | $MPa\sqrt{m}$ |
| $K_{I,th}$ | Threshold-Spannungsintensitätsfaktor (Rissinitiierung) | $MPa\sqrt{m}$ |
| K_I | Spannungsintensitätsfaktor (ModThresolde-I) | $MPa\sqrt{m}$ |
| K_R | Längenabhängiger Spannungsintensitätsfaktor | $MPa\sqrt{m}$ |
| K_A | Anisotropiefaktor | - |
| $K_{D,x}$ | Größeneinflussfaktor des Volumens bzw. der Oberfläche | - |
| K_d | Technologischer Größenfaktor allgemein | - |
| $K_{S,x}$ | Spannungseinflussfaktor bei Volumen- bzw. Oberflächenbetrachtung | - |
| $\Delta K_{I,th}$ | Spannungsintensitätsamplitude, bei der das Risswachstum initiiert wird | $MPa\sqrt{m}$ |
| l | Länge | mm |
| m | Weibullmodul | - |

| | | |
|---|--|-------------------|
| M | Mittelspannungseinfluss | - |
| m^* | Weibullparameter der zyklischen Ermüdung | - |
| n | Risswachstumsexponent | - |
| N | Zyklenzahl | - |
| N_o | charakteristische Schwingenspielzahl der zyklenabhängigen Weibullverteilung | - |
| N_f | Schwingenspielzahl bis zum Versagen | - |
| P_a | Ausfallwahrscheinlichkeit | - |
| p | Risswachstumsexponent für Spannungsintensitätsamplitude | - |
| φ | Raumwinkel | ° |
| $P_{\bar{U}}$ | Überlebenswahrscheinlichkeit | - |
| q | Risswachstumsexponent für Spannungsintensitätswert | - |
| $R_{m,N}$ | Zugfestigkeit am Normdurchmesser N ermittelt | MPa |
| $R_{m,Bauteil}$ | auf die Bauteilgröße umgerechnete Zugfestigkeit | MPa |
| $R_{p,N}$ | Fließgrenze am Normdurchmesser N ermittelt | MPa |
| R_m | Zugfestigkeit | MPa |
| R_p | Fließgrenze | MPa |
| R | Spannungsverhältnis bei zyklischer Beanspruchung (Unter/Oberspannung) | - |
| S_o | Einheitsfläche | 1 mm ² |
| S | Fläche | mm ² |
| S_{eff} | effektive Oberfläche | mm ² |
| $\sigma_{Anwendung}$ | Vergleichsspannung aus dem Bauteil | MPa |
| $\sigma_{zul.}$ | Zulässige Spannung aus den Werkstoffversuchen | MPa |
| $\sigma_{I,max}, \sigma_{II,max}, \sigma_{III,max}$ | Maximale Hauptnormalspannungen im Bauteil | MPa |
| $\sigma_{eq.}$ | Skalare Vergleichsspannung, die aus dem Bauteil mit mehr-axialem Spannungszustand ermittelt wird | MPa |
| σ_n | Normalspannung (für uniaxialen Spannungszustand) | MPa |
| $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ | Normalspannungen in x-, y- und z-Richtung | MPa |
| σ_0 | Inertfestigkeit | MPa |
| σ_c | Charakteristische Bruchspannung (üblicherweise durch Biegeversuch ermittelt) | MPa |
| $\sigma_{0,mit Druck}^*$ | Referenzspannung am Prüfkörper unter Torsion und Druck | MPa |

| | | |
|----------------------------|---|-------------------------|
| $\sigma_{0,ohne\ Druck}^*$ | Referenzspannung am Prüfkörper unter reiner Torsion | <i>MPa</i> |
| $\dot{\sigma}$ | Spannungsrampe $d\sigma/dt$ | <i>MPa/sec</i> |
| σ_D | Druckfestigkeit | <i>MPa</i> |
| σ_w | Wechselfestigkeit | <i>MPa</i> |
| σ_{BK} | Betriebsbauteilfestigkeit | <i>MPa</i> |
| σ_a | Spannungsamplitude | <i>MPa</i> |
| σ_f | Statische Spannung, unter der ein Bauteil nach einer Zeit t_f versagt | <i>MPa</i> |
| $\sigma_{a,1}$ | Maximal auftretende Spannungsamplitude im Betrieb | <i>MPa</i> |
| σ_m | Mittelspannung | <i>MPa</i> |
| $t_{Anwendung}$ | Verweildauer | <i>sec</i> |
| t_f | Lebensdauer bis zum Bruch bei anliegender Spannung σ_f | <i>sec</i> |
| $t_{f,c}$ | Lebensdauer unter zyklischer Beanspruchung | <i>sec</i> |
| ϑ | Raumwinkel | ° |
| V | Volumen | <i>mm³</i> |
| V_{eff} | effektives Volumen | <i>mm³</i> |
| V_0 | Einheitsvolumen | <i>1 mm³</i> |
| v | Rissfortschrittsgeschwindigkeit | <i>mm/sec</i> |
| Y | Geometriefaktor des Risses | - |

Indizes

| | |
|------------------------|--|
| x_1, x_2 | Index zur allgemeinen Unterscheidung verschiedener Belastungsfälle |
| $x_{ohne\ Druck}$ | Index für Lastfall „reine Torsion“ |
| $x_{mit\ Druck}$ | Index für Lastfall „Torsion und Druck“ |
| $x_{Bauteil}$ | Index für Bauteilkennwerte |
| x_{Probe} | Index für Probekörperkennwerte |
| x_V | Index für volumenbezogene Rechnungen |
| x_S | Index für oberflächenbezogene Rechnungen |
| x_{eff} | Index für effektive Größe (gewichtete Oberfläche bzw. gewichtetes Volumen) |
| x_I, x_{II}, x_{III} | Index für Hauptrichtungen (Spannungen, Belastungsmoden) |

Abkürzungen

| | |
|----------|---|
| ABAQUS | Finite-Elemente-Software |
| CARES | Ceramic Analysis and Reliability Evaluation of Structures - Postprozessor zur Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit von keramischen Bauteilen von der NASA |
| DFG | Deutsche Forschungsgemeinschaft |
| FEA | Finite-Elemente-Analyse |
| FEM | Finite-Elemente-Methode |
| HNS | HauptNormalSpannungshypothese ohne Berücksichtigung der Risslage |
| IKM | Institut für angewandte Materialien – Keramik im Maschinenbau - Karlsruhe |
| IMW | Institut für Maschinenwesen – TU Clausthal |
| KIT | Karlsruhe Institute of Technology |
| LEBM | Linear-elastische Bruchmechanik |
| NPT | NichtProportionale Spannungen - Torsion |
| NSmR | NormalSpannungshypothese mit Berücksichtigung der Risslage |
| PKT | Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik der TU Hamburg-Harburg |
| PIA | Principle of Independent Action |
| SFB 483 | Sonderforschungsbereich „Hochbeanspruchter Gleit- und Friktionssysteme auf Basis ingenieurkeramischer Werkstoffe“, DFG |
| SPP 1466 | Schwerpunktprogramm 1466 der DFG „Unendliche Lebensdauer für zyklisch beanspruchte Hochleistungswerkstoffe“ |
| STAU | Statistisch Auswertung – Postprozessor für ein Finite-Elemente-Programm (ABAQUS oder ANSYS) zur Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit von keramischen Bauteilen vom KIT, Karlsruhe |
| TUHH | Technische Universität Hamburg-Harburg |
| WEIBULL | Postprozessor zur Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit von keramischen Bauteilen des IMW der TU Clausthal-Zellerfeld |

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Die Zunahme an Werkstoffvielfalt macht es dem Konstrukteur oft schwer, eine geeignete Auswahl zu treffen. Historisch bedingt gelten die bekannten Auslegungsrichtlinien meist nur für metallische Bauteile, so dass es für den Konstrukteur ein Entwicklungsrisiko bedeutet, sich mit unbekannteren aber vielversprechenden Werkstoffen auf neues Terrain zu begeben. Für neu entwickelte Werkstoffe gilt, dass das Werkstoffwissen deutlich größer ist als das Anwenderwissen über das Langzeitverhalten der daraus gefertigten Bauteile. Die Anisotropie einzelner Werkstoffe kann gezielt vom Konstrukteur genutzt werden, erfordern aber ein wesentlich höheres Werkstoffwissen. Je nach Werkstoffwahl wird auch die Gestalt des Bauteils entsprechend anders ausfallen. Parallel zur Werkstoffentwicklung etabliert sich daher in der Produktentwicklung eine Werkstoffmethodik, die den Konstrukteur bei der Werkstoffauswahl unterstützen soll. Eine methodische Werkstoffauswahl bedingt jedoch, dass das implizite Erfahrungswissen in explizites Konstruktionswissen überführt wird. Um die Werkstoffe miteinander vergleichen zu können, sind allgemein anwendbare Auslegungsvorschriften notwendig.

Keramik als Konstruktionswerkstoff wurde in den 1990er Jahren als Folge der Entwicklung von Hochleistungskeramiken bekannt. Bei vielen tribologischen und thermischen Anwendungen im Maschinenbau erhoffte man sich durch Keramik eine Leistungsverbesserung der Produkte. Der Werkstoff Keramik war bis dahin in der Konstruktion wenig bekannt. Es wurden viele Entwicklungen gestartet, die sich nachher als zu teuer oder konstruktiv zu schwer beherrschbar herausstellten.

Inzwischen hat sich Keramik in vielen Spezialanwendungen durchgesetzt. Die Überschätzung des Potenzials keramischer Strukturbauteile in den 1990er Jahren führte jedoch dazu, dass der Werkstoff in den folgenden Jahren nicht mehr im Konstruktionsfokus stand und sich in den Auslegungsmethoden des Maschinenbaus nicht etabliert hat.

Durch neue Werkstoffentwicklungen und Optimierung der Fertigungsprozesse weist Keramik nach wie vor hohe Potenziale auf. Die Forderung nach nachhaltigen Produkten wird Keramik als umweltfreundlichen, abrasions- und korrosionsbeständigen, verschleißfesten Werkstoff neue Anwendungsfelder im Maschinenbau eröffnen. Neben reinen Herstellkosten haben heutzutage die Betriebs- und Entsorgungskosten, sowie die Lebensdauer (Standzeiten) der Produkte einen immer größeren Stellenwert. Weiterer Fokus der Nachhaltigkeitsdebatte ist die Energieeffizienz, die durch niedrigere Reibung, durch Einsparungen von Zusatzaggregaten für Schmierung und Kühlung oder auch durch verbesserte thermische Prozesse, die mit erhöhten Prozesstemperaturen verbunden sind, verbessert werden kann. Hier wird Keramik in Zukunft eine verstärkte Rolle spielen.

1.2 Problemstellung

Die Technische Keramik spielt als Konstruktionswerkstoff eine Nischenrolle, so dass sie bei der Werkstoffauswahl neuer Produkte oft nicht berücksichtigt wird. Wenn Keramik als potenzieller Werkstoff in die Produktentwicklung einbezogen wird, werfen sich schon in den frühen Entwicklungsphasen viele Fragen auf. Es fehlt die Erfahrung in der Konstruktion und Fertigung, aber auch passende Auslegungsmethoden.

Üblicherweise werden in der ersten Konstruktionsphase nur grundlegende Werkstoffdaten benötigt, um die geeignete Werkstoffklasse zu bestimmen. Die Anforderungen an die Funktion eines Bauteils (physikalisch, mechanisch sowie geometrisch) führen methodisch oder intuitiv zu einer geeigneten Werkstoffklassenauswahl. Fällt die Wahl auf einen herkömmlichen metallischen Werkstoff, wird die Funktion in einem Bauteil bzw. einer Baugruppe entsprechend gestaltgebend umgesetzt. Die bekannten Festigkeitskennwerte liegen dem Konstrukteur in Form von Tabellenwerken vor, so dass er sich aus der Werkstoffklasse den entsprechenden Werkstoff auswählen kann.

Bei neueren Werkstoffen, z. B. Faserverbundwerkstoffen, gradierte Werkstoffen, aber auch Keramiken, fällt die Auswahl dagegen schwerer, da sich bisher kein standardisierter Auslegungsvorgang etabliert hat. Durch diese wachsende Werkstoffvielfalt vergrößert sich auch der Einflussnahme des Konstrukteurs grundlegend.

Eine Auslegung keramischer Bauteile scheint ohne spezifisches Werkstoffwissen für den Konstrukteur auf den ersten Blick nicht möglich. Keramische Werkstoffe verhalten sich entgegen anderer neuer Werkstoffe makroskopisch gesehen isotrop und linear-elastisch und sind damit strukturmechanisch einfach zu berechnen. Die konstruktiven Schwierigkeiten liegen in der fehlenden Duktilität und der hohen Festigkeitsstreuung, die zu hohen Sicherheitsaufschlägen führen. Es fehlen in der Konstruktion Erfahrungswerte, die zu einer empirischen Auslegungsvorschrift analog zu den Richtlinien für metallische Bauteile geführt hätten [FKM03]. Man findet keine Quellen, die auf eine konkrete Vorschrift zur Festigkeitsauslegung verweisen [BRE98]. Die Festigkeit und Festigkeitsstreuung des Werkstoffes im

ausgeführten Bauteil hängt außerdem stark vom Fertigungsverfahren und den Werkstoffkonturen ab, so dass die Hersteller von einer verpflichtenden Festigkeitsangabe in der Regel absehen.

Einige Hersteller beschäftigen sich damit, keramische Bauteile, zum Beispiel Zahnräder oder Wälzlager, in gleicher geometrischer Abmessung auszuführen wie die metallische Bauteilausführung [PM-Wöt11]. Ein solcher Nachbau bedeutet, dass im keramischen Bauteil ähnlich hohe Spannungen vorliegen wie im metallischen Originalbauteil. Andere Hersteller betonen, dass keramische Bauteile keine Zugspannungen aufweisen dürfen [PM-MAY11]. Nach dieser Aussage dürfen überhaupt keine Strukturbauteile aus Keramik gefertigt werden, da es nahezu unmöglich ist, ein Bauteil ohne Zugspannungen auszuliegen.

Damit keramische Werkstoffe in der Konstruktionspraxis eingesetzt werden können, benötigt es jedoch einer qualitativen Beurteilung von Konstruktionsvarianten aus Keramik. Liegen dem Konstrukteur entsprechende Auslegungskriterien vor, können mit Hilfe gängiger Auslegungsroutinen (zum Beispiel Spannungsberechnungen mit Strukturoptimierung durch Finite-Elemente-Methoden) verschiedene Entwurfsvarianten erstellt werden, die die Werkstoffeigenschaften von Keramik berücksichtigen.

1.3 Zielsetzung der Arbeit

Inhalt der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung von vollkeramischen Bauteilen unter mehraxialen, mechanischen Beanspruchungen. Solche keramischen Bauteile, die in ihrer Funktion auch Kräfte und Momente übertragen, werden im Weiteren als keramische Strukturbauteile bezeichnet. Ziel der Arbeit ist es, dem Konstrukteur einen Einblick in unterschiedliche Versagensmechanismen zu geben und vereinfachte Festigkeitsberechnungen zur Dimensionierung von mehraxial beanspruchten Bauteilen aus Keramik aufzuzeigen.

Der experimentelle Fokus soll auf der zyklischen Beanspruchbarkeit von unterschiedlichen keramischen Werkstoffen unter Torsion und der Überlagerung von Druckspannungen liegen. Die Zusammenhänge zwischen Rissentstehung, Risswachstum und Ermüdung sollen hierbei genauer betrachtet werden. Die Ergebnisse sind analytisch auszuwerten, um verallgemeinernde Aussagen zum Versagen von Keramik unter mehraxialer Beanspruchung zu formulieren.

Es ist ein für den Konstrukteur allgemeingültiges, vereinfachtes Berechnungsverfahren zu formulieren. Dieses vereinfachte Berechnungsverfahren soll an einfachen Maschinenbauteilen angewendet und der komplexen Berechnung durch numerische Integration gegenübergestellt werden, um das Verfahren zu verifizieren.

Ziel der Arbeit ist es, Keramik als Werkstoff in der strategischen Werkstoffauswahl des Produktentstehungsprozesses mit einbeziehen zu können. Hierzu soll die Produktentwicklung mit keramischen Bauteilen näher betrachtet werden. Im Fokus stehen die Methoden der

Werkstoffauswahl und die daraus resultierenden Folgen auf die Gestaltung von Bauteilgruppen. Ein solcher Entwurfsprozess unter Einbindung von keramischen Bauteilen soll an eigenen ausgewählten Produkten aufgezeigt werden.

Die vorliegende Arbeit besteht somit aus einem bruchmechanischen, einem experimentellen, einem analytischen, sowie einem methodischen Abschnitt. Sie soll dem Ingenieur einen Überblick über die Auslegung von keramischen Strukturbauteilen aus der Sicht der Produktentwicklung bieten.

2 Stand der Forschung

2.1 Anwendung von Keramik im Maschinenbau

2.1.1 Historie

Im vorindustriellen Leben hat der Mensch die Materialien verwendet, die einfach zur Verfügung standen. Neben biologischen Materialien, wie Holz, Pflanzenfasern oder Leder wurden vor allem nichtmetallische anorganische Werkstoffe verwendet, wie Stein, Ton, Ziegel, Glas oder Porzellan. In der Phase der Industrialisierung haben die metallischen Werkstoffe die nichtmetallischen Werkstoffe weitestgehend verdrängt, so dass man in industriellen Anwendungen des letzten Jahrhunderts fast ausschließlich metallische Werkstoffe im Maschinenbau findet. Gleichzeitig wurde die Ingenieurskunst in die universitäre Wissenschaftslandschaft integriert, so dass parallel zur metallverarbeitenden Industrie eine wissenschaftliche Begleitung der Werkstoffentwicklung und Konstruktionstechnik stattfand. Aus dieser Zeit stammen die meisten Normen und Auslegungsrichtlinien.

Wie in *Bild 1* zu sehen ist, findet seit den 60er Jahren ein entgegengesetzter Verdrängungswettbewerb statt, so dass neben metallischen Werkstoffen zukünftig Kunststoffe, Keramiken und Verbundwerkstoffe eine größere Rolle spielen werden. Dieses erfordert eine ebensolche interdisziplinäre wissenschaftliche Begleitung der neueren Werkstoffe, wie sie im letzten Jahrhundert für die metallischen Werkstoffe stattgefunden hat.

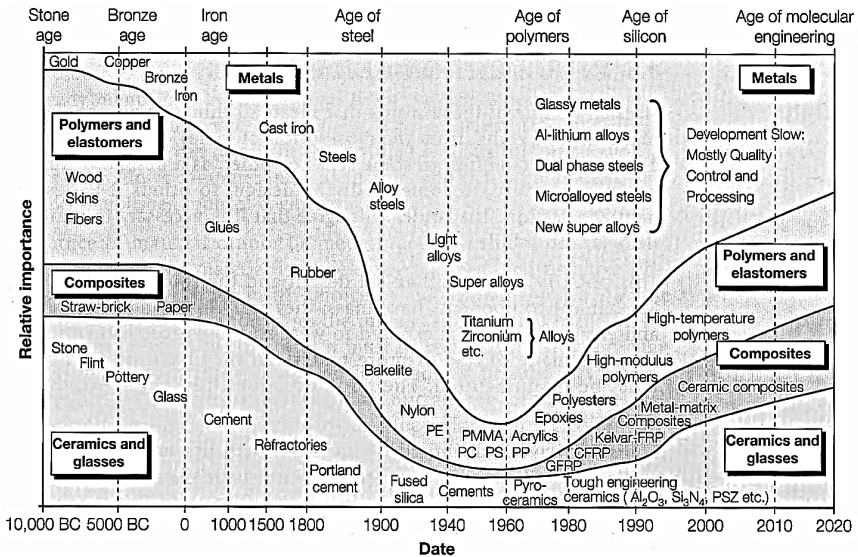


Bild 1: Evolution in der Werkstoffanwendung [ASH10]

2.1.1.1 Erste Hälfte des 20. Jahrhunderts

Keramische Werkstoffe wurden in technischen Anwendungen zuerst als Isolatoren verwendet. Die Zündkerze als meistverbreitetes keramisches Maschinenbauteil wurde Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts von Gottlob Honold entwickelt. In [Rysch48] wird anhand ausgewählter industrieller Keramikbauteile dokumentiert, welchen Fortschritt die Entwicklung der Sintertonerde für thermische und chemische Anwendungen in der ersten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts bedeutet. Zur Zündkerze heißt es hierzu: "Die hohe chemische Beständigkeit der Sintertonerde bei hohen Temperaturen wird in Verbindung mit der guten Wärmeleitfähigkeit und zugleich Elektroisolerfähigkeit für die Herstellung von besonders warmfesten Zündkerzen für die Verbrennungsmotoren in großem Maßstab angewandt. Hierbei kann aus Festigkeits- und aus chemischen Gründen sowie infolge der besseren Isolierfähigkeit,... die Form des eigentlichen Isolators der Zündkerze"..."schmäler und länger als bisher gewohnt ausgebildet werden."

Die Elektroindustrie ist ohne keramische Bauteile nicht denkbar und ist auch der erste Industriezweig, der sich mit der Normung keramischer Werkstoffe auseinandergesetzt hat. So ist es nicht verwunderlich, dass die Werkstoffe, die genormte Festigkeitskennwerte auf-

weisen, diejenigen sind, die vor allem in der Elektroindustrie verwendet werden. Die Elektrotechnik ist daher auch der erste Industriezweig, der allgemeine Toleranzen für keramische Bauteile erarbeitet hat (s. DIN 40680 und DIN 40686). Die Elektrifizierung, die im vorletzten Jahrhundert Einzug gehalten hat, ist ohne keramische Komponenten nicht denkbar. Die Zündkerze ist eines der bekanntesten Erfolgsprodukte.

Weitere großer Anwendungsbereiche findet man im produzierenden Gewerbe, in dem schon Mitte des letzten Jahrhunderts große Stückzahlen zu verzeichnen sind. Die damals schon stark industrialisierte Textilindustrie kann durch den Einsatz keramischer Fadenführer wesentlich höhere Standzeiten für ihre Maschinen erreichen, was zu einem großen Produktionsvorteil führt.

Die Entwicklung dieser Innovation hat auch hier eine enge Zusammenarbeit zwischen Keramikern und Anwendern erfordert. „Im Laufe der vertrauensvollen Zusammenarbeit zwischen dem Hersteller der Sintertonerde-Fadenführer einerseits und dem Kunstfadenhersteller andererseits ist es bald gelungen, wirklich allen gerechten Anforderungen entsprechende Fadenführer aus Sintertonerde zustande zu bringen. Derartige Fadenführer halten gut ein Jahr und müssen nur von Zeit zu Zeit geputzt werden... Dadurch werden dem Betrieb viele Arbeitsstunden erspart“ [Rysch48]. Die Einsatzkosten der teureren Materialauswahl können hierdurch schnell kompensiert werden.

Ein weiteres Anwendungsgebiet, das sich zu dieser Zeit etabliert, sind Schneidkeramiken, die zu längeren Standzeiten bei spanenden Verarbeitungsmaschinen führen. Auch Gleitringdichtungen aus Keramik halten schon Mitte des letzten Jahrhunderts Einzug in den Maschinenbau [Rysch48]. Jedoch erst durch Verbesserung der Werkstoffqualität und der Optimierung der Fertigungsprozesse können flächendeckend Stopfbuchspackungen durch Gleitringdichtungen ersetzt werden, die zuerst größtenteils aus Oxidkeramiken, inzwischen jedoch überwiegend aus Siliziumcarbid (SiC) hergestellt werden.

Ausschlaggebend für den erfolgreichen Einsatz dieser Bauteile sind vor allem die guten tribologischen Eigenschaften. Die Beanspruchungen im Bauteil wird durch die Wahl der Bauteilgeometrie sowie im Falle der Gleitringdichtungen durch gezielte mechanische Entlastung möglichst klein gehalten.

Wesentlich für den Markterfolg dieser Bauteile gegenüber der nichtkeramischen Vorgängergelösung ist die Tatsache, dass die Reduzierung der Instandhaltungskosten durch die erzielte Standzeitverbesserung weit größer ist als die höheren Herstellkosten. Eine Zusammenfassung von tribologischen Anwendungen im Maschinenbau findet man gut beschrieben in [BAR03].

Die Vorteile der keramischen Werkstoffe, wie gute chemische Beständigkeit, gute tribologische Eigenschaften, längere Standzeiten durch geringen Verschleiß, gut zu reinigende Oberflächen, hohe Festigkeiten, geringe Verformung, geringe Fließneigung, niedrige Temperaturdehnung, sowie isolierende und nichtmagnetische Eigenschaften sind hier die Erfolgsfaktoren für die Keramik, die sich dennoch nur im Einzelfall durchsetzen können.

2.1.1.2 Zweite Hälfte des 20ten Jahrhunderts

Die Qualität der keramischen Werkstoffe kann in den folgenden Jahren wesentlich gesteigert werden, so dass man in den achtziger und neunziger Jahren des letzten Jahrhunderts viele neue Anwendungsfelder für höher beanspruchte Bauteile aus Keramik findet. Die Forderung nach thermisch und/oder tribologisch hochbeanspruchten Bauteilen aus Keramik führt zur Entwicklung von komplexen Bauteilstrukturen. In diesen Bauteilen treten höhere mechanische Beanspruchungen auf. Diese mechanisch beanspruchten Bauteile werden in der Literatur als „Strukturkeramik“, „Konstruktionskeramik“, „Industrie-“, oder „Ingenieurskeramik“ bezeichnet. Im vorliegenden Text wird daher bei vorliegender mechanischer Beanspruchung von „keramischen Strukturbauteilen“ gesprochen [BR03].

Möglich wird die hier beschriebene Bauteilentwicklung erst durch eine verbesserte Werkstoffqualität mit geringerer Werkstoffstreuung, d. h. einem höherem Weibull-Modul. In [GRA93] wird auf die Entwicklung von Fahrzeug-Gasturbinen verwiesen, die „seit 10 Jahren mit keramischen Rotoren laufen“ und in [RÄU79] sowie [TIE84] näher beschrieben werden. In gleichem Vortragsband [GRA93] ist die Auslegung von Motorkomponenten aus Siliziumnitrid zusammengefasst.

In [GAF97] wird der Einsatz von Siliziumkarbid-Gleitlagern näher beschrieben. Das neue Lagerkonzept benötigt keinerlei Fremdschmierung mehr, da die Lager in das Innere der Pumpe verlegt wurden, so dass die Lager durch das Fördermedium selbst geschmiert werden. Auch die keramischen Wälzlager werden in dieser Zeit weiterentwickelt, so dass heutzutage Siliziumnitrid-Keramiklager als Standardlager in Hochleistungsanwendungen zu finden sind [PK-SCHAE]. Die hier beschriebenen, in den letzten Jahrzehnten entwickelten Strukturbauteile zeichnen sich durch höhere mechanische und auch thermische Beanspruchungen aus.

In [DKG97] werden unter dem Titel „keramische Werkstoffe in Maschinen und Anlagen“ verschiedene Entwicklungen mit keramischen Werkstoffen beschrieben. Es werden als keramische Strukturbauteile unter anderem eine Exzentrerschneckenpumpe, ein pneumatisches Fördersystem, magnetgekuppelte Pumpen mit keramischen Spalttöpfen und ein keramischer Heißgasventilator mit komplexer Bauteilgeometrie vorgestellt. Im Zuge dieser Entwicklungstendenzen werden zum einen verstärkt Werkstoffuntersuchungen für die oben angeführten Einsatzbereiche vorgenommen, zum anderen Auslegungskriterien für

mehrxial beanspruchte Bauteile diskutiert. In [BRÜ93] wird die Fehlerpopulation und Rissgeometrie des eindimensionalen Spannungszustands auf mehrachsige Beanspruchungen, wie sie in solchen Bauteil vorkommen, überführt, um mehrachsige Spannungszustände in der Festigkeitsberechnung berücksichtigen zu können. Auf die Auslegungskriterien, sowie die damit einhergehenden Werkstoffuntersuchungen wird im weiteren Verlauf näher eingegangen.

Das Interesse an keramischen Strukturbauteilen ist in diesen Jahrzehnten hoch. So wurden vor allem in den 90er Jahren im Zuge der Ventilentwicklung (Verbesserung der Standzeiten) und der angestrebten Wirkungsgradverbesserung von Dampf- und Gasturbinen durch höherer Betriebstemperaturen umfangreiche Untersuchungen zur Thermoschockempfindlichkeit vom keramischen Werkstoffen geleistet. Keramik wird vor allem als Ersatzwerkstoff für Hochtemperaturanwendungen gesehen, in Temperaturbereichen über 1400 °C, bei denen die Festigkeiten der Stähle exponentiell mit der Temperatur abnehmen. In [JAK97] wird zum Beispiel ein keramisches Heißgasventilatorrad entwickelt. Die Erfolge fielen jedoch hinter den Erwartungen zurück, so dass Mörgenthaler am Ende seiner technischen Ausführungen in [MÖR93] zusammenfassend bemerkt: „Für einzelne keramische Bauteile konnte die technische Anwendbarkeit im Motorenbau nachgewiesen werden. Der Einsatz keramischer Strukturbauteile im Motorenbau tangiert jedoch sehr stark mit der Frage der Wirtschaftlichkeit“.

Die bekannte Ventilentwicklung bei Daimler wird als technisch hochwertig gehandelt, kann sich letztendlich jedoch nicht im Massenmarkt unter dem damit einhergehenden Preisdruck durchsetzen.

Unter dem Titel „Anwendung von Keramik im konstruktiven Einsatz“ heißt es in [GUG93]: „Zwar ist die Festigkeit im Prinzip bei der Keramik hoch, aber sie kann wegen ihrer bekannten Sprödigkeit bei weitem nicht ausgeschöpft werden. Die hohe Festigkeit konnte früher nur in der Druckbeanspruchung ausgenutzt werden, denn die oft recht großen rohstoff- und verarbeitungsbedingten Fehler bei der klassischen Keramik erlauben keine Zugbeanspruchungen.“...weiter heißt es hier: „Es konnte aber bereits gezeigt werden, dass Keramik trotzdem Beachtliches leisten kann. Am Beispiel der Gasturbinen, welche schon vor ca. 10 Jahren mir keramischen Rotoren in zwei Prototypen auf der Straße gelaufen ist, sei dies dokumentiert. Der Weg zum Erfolg führt allerdings immer auch über leidvolle Bruch-Erfahrungen, die zu überwinden sind, um den Weg zum erfolgreichen Einsatz freizumachen.“ Diese „Brucherfahrung“ und die fehlenden Auslegungskriterien im Maschinenbau machen Keramik zu einem unbekanntem, unbeherrschbaren Werkstoff für den Konstrukteur, der „in der Praxis (nur) entsprechend intuitivem Wissen...aus der langjährigen Erfahrung mit der Auslegung keramischer Bauteile...“ eingesetzt werden kann. [BRE98]

Eine gute Zusammenfassung zur den Entwicklungen der 1990er Jahre ist dem Sammelband von [GRA93] zu entnehmen.

Neben diesen Hochleistungsanwendungen im Maschinenbau, haben sich auch in der Medizintechnik keramische Werkstoffe seit Mitte des letzten Jahrhunderts etabliert. So haben keramische Hüftgelenke Ausführungen anderer Werkstoffe abgelöst, nachdem zum einen die Zähigkeit der Keramik durch die Entwicklung neuer Werkstoffzusammensetzungen erheblich gesteigert werden konnte (z. B. teilstabilisiertes Zirkonium), zum anderen bei alternativen Werkstoffpaarungen immer wieder biomedizinische Unverträglichkeiten auftraten, was zu körperliche Beschwerden führte. Auch hier steht eine intensive Entwicklungsgeschichte dem wesentlich verbesserten Nutzen gegenüber.

Die Ursprünge der Entwicklung des letzten Jahrhunderts werden in [SED00] näher beschrieben, eine technische Zusammenfassung der Werkstoffentwicklung und der Festigkeitsuntersuchung von Hüftprothesen ist [CAL00] zu entnehmen. Nach beschichteten metallischen Gleitkontakten, sowie Paarungen aus Kunststoff/Metall oder Keramik/Metall konnte der Abrieb im Gelenk durch Keramik/Keramik-Paarung wesentlich gesenkt werden. Der Kompromiss zwischen guter Tribologie und guter Zähigkeit bei Aluminium- und Zirkonoxidkeramik, sowie die in Realität nicht zu vernachlässigende Bruchproblematik werden in [THOM03] und [WAL97] näher beschrieben. Dem guten tribologischen Verhalten im funktionsgerechten Zustand steht ein extrem hoher Abrieb bei gebrochener Keramikkomponente gegenüber, wenn sich Keramikpartikel in die nichtkeramischen Gegenlaufpartner einarbeiten.

Die Gesamtproblematik des „plötzlichen Versagens“, dass auch im Maschinenbau ausschlaggebendes Konstruktionskriterium ist, wird in [DUER09] folgendermaßen beschrieben: „Da Keramikbrüche aufgrund ihres besonderen Entstehungsmechanismus plötzlich und unvermittelt auftreten, sind auslösende Faktoren, wie verstärkte körperliche Aktivität oder Belastung, oft nicht erkennbar. Keramikfragmente zwischen der Metallpaarung oder eingepresst in einen Polyethylen-Inlay verursachen in erheblichen und teilweise katastrophalen Maße Metallabrieb“ Aus einer Auswertung aus dem medizinischen Meldesystem kann man aus [HEI05] entnehmen, dass gerade bei keramischen Prothesen als Versagensursache „Designprobleme“ genannt werden, was darauf hinweist, dass der Einsatz von Keramik gezieltes konstruktives Wissen erfordert.

Neben spannungsmechanischen Untersuchungen stellen sich bei Gelenkimplantaten aus Keramik auch tribologische Anforderungen an die Bauteile. In [HOT11] wird zum Beispiel der Einfluss von Bewegung, Belastungen und Gestalt einer Hüftgelenkprothese auf das Geräuschktrum untersucht, da es bei Keramik/Keramik-Paarung während des Laufens zu einem hörbaren Quietschen im Gelenk kommen kann.

Bei Zahnimplantaten sind ähnliche Entwicklungstendenzen zu beobachten. Da Zähne zu den hochbeanspruchten „biologischen Strukturbauteilen“ gehören, die zyklischen Beanspruchungen unter korrosiver Umgebung ausgesetzt sind, laufen in den letzten Jahren viele Untersuchungen zur Untersuchung der Risszähigkeit sowie Dauerfestigkeit und Beanspruchbarkeit von keramischen Zahnimplantaten, zum Beispiel in [CLAU10]), sowie umfangreiche Untersuchungen an natürlichem Zahnmaterial [ANG11], [Bec12]. Neben Fragen zum Werkstoffdesign werden auch strukturmechanische Fragestellungen zur Ausgestaltung von Implantaten behandelt. In [JAG05] werden zum Beispiel die Spannungen in keramischen Zahnkronen in Verbindung mit dem darunterliegenden Cement mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) unter Berücksichtigung der Beißkraft, der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Keramik und Cement sowie der Schrumpfspannungen bei der „Montage“ der keramischen Krone untersucht.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Keramik sowohl im Maschinenbau als auch in der Medizintechnik ein hohes Entwicklungspotenzial zugeschrieben werden kann. Notwendig zur Ausschöpfung dieses Potenzials ist die genauere Kenntnis und Beschreibung der Versagensmechanismen, die Einbeziehung von numerischen Spannungsuntersuchungen (FEM) in den Auslegungsprozess sowie das Erarbeiten standardisierter Auslegungsrichtlinien und Werkstoffnormen.

2.1.1.3 Zukünftige Entwicklung

Die heutigen Entwicklungen sind geprägt durch den verstärkten Einsatz von Simulationsmodellen und differenzierten Prüfmethode. Auch die reproduzierbare Qualität der synthetisch hergestellten Keramikpulver macht die Keramik für Hochleistungsanwendungen interessant. Die Medizintechnik als expandierender Industriezweig ist mit seinen Zahnimplantaten und der Prothesenentwicklung Trendsetter in den Anwendungen von Strukturkeramik. Neben der vergleichsweise höheren Akzeptanz des Industriezweigs für hohe Materialkosten sind keramische Werkstoffe vor allem hinsichtlich ihrer Bioverträglichkeit als Material für Implantate interessant.

Bei der neueren Werkstoffentwicklung kann generell festgestellt werden, dass die Werkstoffe gezielt für die spezifische Anwendung weiterentwickelt werden. Neue Werkstoffe sind dann oft nicht mehr monolithische Materialien. Durch gezielte Zusätze erhält man mehrphasige Keramiken (z. B. bei ZrO_2), Faserverstärkungen führen zu vermindertem Risswachstum und anisotropem Werkstoffverhalten (z. B. glasfaserverstärkte Zahnimplantate) oder durch Matrixverbünde (matrix-metal) erhält man gradierte Werkstoffe, die lokal isotrop, global jedoch anisotrop aufgebaut sind. Bei Faserverbundkeramiken sind die Eigenschaften lagenabhängig und die konstruktiven Anforderungen orientieren sich nicht mehr am herkömmlichen Sinterverfahren. Die Fertigungs- und Auslegungsverfahren ähneln

mehr den bekannten Verfahren der faserverstärkten Kunststoffe, wenn auch auf anderem Temperatur- und Festigkeitsniveau.

Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass die Materialvielfalt in den nächsten Jahren bei keramischen Werkstoffen zunehmen wird. Die Neuentwicklungen stehen im Verdrängungswettbewerb mit den herkömmlichen metallischen Werkstoffen. Die Eigenschaften der einzelnen Werkstoffarten nähern sich aneinander an, indem die Lücken zwischen den Werkstoffgruppen sukzessive geschlossen werden [ASH11].

Für die Keramik wird in [RöD08] vor allem die Funktionskeramik sowie Verbundkeramik und Keramikverbünde gesehen. Diese erfordern spezifisches Werkstoffwissen, das speziell auf den Einsatzfall abgestimmt sind. In [Nie08] wird jedoch darauf hingewiesen, dass auch die monolithische Keramik sich in Zukunft noch auf weiteren Märkten etablieren wird. Dieses liegt zum einen an den expandierenden Rohstoffpreisen, von denen die Metalle wesentlich mehr betroffen sind als die Keramiken. Zum anderen führt die Rohstoffknappheit zu höheren Forderungen an die Energieeffizienz von Produkten. Vor allem die Standzeiterhöhung durch die guten tribologischen und thermischen Eigenschaften der Keramik führt zu einer positiven Kosten- aber auch Energiebilanz beim Einsatz von keramischen Alternativen. In [Kit08] wird ein Versuch unternommen, die gesamte Energiebilanz über den Lebenszyklus von keramischen Bauteilen zu erfassen.

Nach diesem historischen Abriss kann zusammenfassend festgestellt werden, dass sich die Entwicklung keramischer Strukturbauteile immer dann auf dem Markt durchsetzt, wenn die Vorteile, die aus der Materialwahl entstehen, größer sind, als die offensichtlichen Nachteile der vergleichsweise hohen Stückkosten sowie der hohen Spröbruchgefahr. In der folgenden – an [Gug93] angelehnten *Tabelle 1* – sind die Anforderungen an den Werkstoff für verschiedene Einsatzbereiche aufgelistet. Erfahrungsgemäß müssen mindestens drei dieser Anforderungen gegeben sein, um ein keramisches Bauteil erfolgreich einsetzen zu können.

Tabelle 1: Geforderte keramikspezifische Eigenschaften unterschiedlicher Anwendungen in Anlehnung an [GUG93]

| Eigenschaften | | Wärmeleitfähigkeit gezielt hoch / niedrig | Temperaturwechselbeständigkeit | Temperatur-beständigkeit | Elektrische Isolation | Abriebbeständigkeit | Gleiteigenschaft | Korrosionsbeständigkeit | Niedrige Dichte | Biokompatibilität |
|------------------------|---------------------------|--|--------------------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------|------------------|-------------------------|-----------------|-------------------|
| | | | | | | | | | | |
| | Sanitärarmaturen | | | | | X | X | X | | |
| | Fadenführungen | | | | | x | X | | | |
| | Drahtführungen | | X | | | X | X | | | |
| | Schneidwerkzeuge | X | X | X | | X | | X | | |
| | Laborgeräte | | X | X | X | | | X | | |
| | Lötlehren | | X | X | X | X | | X | | |
| | Panzerungen (Wehrtechnik) | | | | | | | | X | |
| | Metallurgie | | X | X | | | | X | | |
| | Ofenbau | X | X | X | X | X | | | X | |
| | (Industrie-) Brenner | | | X | X | | X | | | |
| | Isolationsbauteile | | | | X | | | | X | |
| | Katalysatorträger | | | X | | | | X | X | X |
| | Brennstoffzelle | X | | | X | | | | | |
| mechanisch beansprucht | Mechanische Dichtungen | X | X | | | X | X | X | | |
| | Regelarmaturen | | X | | | x | | X | | |
| | Umformwerkzeuge | | X | | | X | X | | | |
| | Verschleißschutz | | | | | X | | X | | |
| | Mahlgefäße | | | | | X | | X | | |
| | Knien / Hüftendoprothesen | | | | | X | X | X | X | X |

| | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|----------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|--|
| mechanisch-thermisch beansprucht | Messgerätekompontenten | | X | X | X | X | | X | | |
| | Düsen (gas, flüssig, fest) | | X | | | X | | X | | |
| | Lager | | | X | X | | X | | X | |
| | Chemiepumpen | | X | | | X | | X | | |
| | Wärmetauscher | | X | X | X | | X | | X | |
| | Motor | X | X | X | X | X | X | X | X | |
| | Kompressor | | | | | X | X | | X | |

Das hohe zukünftige Anwendungspotenzial für Ingenieurskeramik zeigt sich in den Ergebnissen des von der DFG geförderten Sonderforschungsbereiches *sfb 483* mit dem Titel „Hochbeanspruchte Gleit- und Friktionssysteme auf Basis ingenieurkeramischer Werkstoffe“, der vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) im Jahr 2000 ins Leben gerufen wurde [ALB11a].

Die „Strategieinitiative für die Keramikforschung in Deutschland“ [RöD08] gliedert die zukünftigen Forschungsschwerpunkte von Keramik in einzelnen Branchen.

1. Neuartige und verbesserte Funktionen
2. Integration, Miniaturisierung, Prozesstechnik und Fertigungstechnik
3. Simulation und Modellierung

Unter Punkt 3 sehen alle Branchen einen Bedarf an Tools und Modellen zu ganzheitlichen Werkstoff- und Bauteilsimulation. Auf den letztgenannten Punkt wird in dieser Arbeit näher eingegangen werden.

2.1.2 Mechanische Auslegung einzelner Komponenten

Der Einzug von keramischen Werkstoffen in den Maschinenbau – und auch in die Medizintechnik – geht mit vielen Einzelauslegungen einher, da wegen fehlenden empirischen Daten und der relativ schnellen Verbesserung der Werkstoffqualitäten jeweils genau auf den Anwendungsfall ausgelegt werden muss. Da die Festigkeitskennwerte von keramischen Werkstoffen nur teilweise genormt sind, geht in den meisten Veröffentlichungen daher die Bauteilentwicklung einher mit gleichzeitiger Ermittlung von Werkstoffkennwerten. In [BAR06] werden ursprünglich metallische Buchsen und Kolben einer Axialkolbenmaschine durch keramische Strukturbauteile ersetzt. Neben der mechanischen Auslegung der eigentlichen Bauteile werden umfangreiche Untersuchungen an Ringproben zur Ermittlung der Werkstoffkennwerte durchgeführt. Zusätzlich wird eine Proof-Test-Einrichtung entwickelt, bei der die Bauteile vorab getestet werden können, um folgenschweren Schäden in

der Anwendung vorzubeugen. Ähnlich ist die Vorgehensweise bei [SCHÖP99], der sich mit der Gestaltung, Berechnung und Erprobung hochbeanspruchter Keramikbauteile beschäftigt. In seiner Dissertation wird ein Innendruckprüfstand entwickelt, um grundlegende Untersuchungen an Ringproben unter Innendruck durchzuführen. Aus den Ergebnissen werden die Bruchzähigkeit und die Risswachstumsparameter ermittelt, die dann für den Festigkeitsnachweis für Lagerplatte und Umsteuerplatten einer Axialkolbenmaschine herangezogen werden.

In [BLA09] wird eine Zusammenfassung von möglichen Konstruktionsvarianten einer Wellen-Naben-Verbindungen (Stahlwelle und Keramiknabe) gegeben, und eine neue Variante wird von ihm mit Hilfe von FEA (Finite-Elemente-Analyse) ausgelegt, der Festigkeitsnachweis wird mit einem Postprozessor namens CARES [CAR89] durchgeführt. Schwerpunkt liegt hier auf der statischen Auslegung der Pressverbindung. Als eine Anwendung einer solchen Verbindung wird in [BIN09] ein Pumpenlaufrad vorgestellt, dass bei hoch abrasiven Fördermedien einzusetzen ist.

In [EDW08] wird die Entwicklung von Wärmetauscherrohren beschrieben. Das Programm CARES wird hier mit einem Lebensdauermodell kombiniert eingesetzt. Auch hier wird wieder auf die fehlenden Werkstoffkennwerte verwiesen. Edwards schreibt hierzu: „Very limited data are available to characterize the creep, continuum damage, and reliability behavior of the material.“

In [SPEI00] wird die Zuverlässigkeit keramische Ventilplatten untersucht. Hier wird sowohl ein statischer Festigkeitsnachweis als auch ein Ermüdungsfestigkeitsnachweis durchgeführt. Die Theorie der Bruchmechanik wird in diesem Zusammenhang grundlegend erläutert. Der Größeneinfluss wird über das am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) entwickelte Programm STAU ermittelt, das die Spannungsdaten der FE-Analyse im Postprozess detaillierter auswertet [HEI03], [RIE07]. Dieser Postprozessor bietet auch die Möglichkeit, aus den Risswachstumsparametern des Materials eine Lebensdauer vorhersage für Bauteile unter bekannten Lastbedingungen zu treffen. In [NOH09] werden mit dem beschriebenen Postprozessor STAU unterschiedliche Geometrievarianten von Druckfedern aus Keramik hinsichtlich ihrer Lebensdauer und Ausfallwahrscheinlichkeit untersucht. Neben einem Festigkeitsnachweis wird hier eine geometrische Standardisierung vorgenommen, die die Ausfallwahrscheinlichkeit von unterschiedlichen Federvarianten abbildet.

Ein gezielt auf zyklische Belastungen ausgelegtes Bauteil, das Vollkeramikventil aus Siliziumnitrid, wird von [MAY06] vorgestellt. Obwohl sich die Entwicklung in den 90er Jahren nicht durchsetzen konnte, zeigt dieser neuere Artikel auf, dass keramische Bauteile wieder diskutiert werden und die offenen Forschungsfragen der zyklischen Beanspruchbarkeit weiter zu bearbeiten sind.

Bei den aufgeführten Bauteilen handelt es sich jeweils um Nachweise bei einer gegebenen Bauteilgeometrie, die Funktion des Bauteils und die Entwicklung einer keramikgerechten Geometrie stehen dabei eher im Hintergrund. Beide genannten Postprozessoren, STAU und CARES, sind nicht im kommerziellen Rahmen verfügbar. Ein weiterer Postprozessor mit dem Namen WEIBULL wurde am Institut für Maschinenwesen (IWM) in Clausthal entwickelt [JAK94]. Ein Vergleich über die verschiedenen - in den Programmen implementierten Versagenshypothesen – findet man in der Dissertation von [NOH09].

Es existiert bisher keine Auslegungsroutine, die es dem Konstrukteur ermöglicht, ein keramisches Strukturbauteil zu dimensionieren, ohne umfangreiche FE-Analysen durchzuführen und umfangreiches Werkstoffwissen aufweisen zu müssen. Dieses ist jedoch in den Entwurfsphase des Konstruktionsprozesses notwendig, um die Baustruktur eines Produkts entwickeln zu können (siehe auch Kapitel 6.1.2, *Keramik im Konstruktionsprozess*). In der vorliegenden Arbeit wird daher erstmalig eine analytische Auslegungsvorschrift entwickelt, die es dem Konstrukteur ermöglicht, ein vollkeramisches Strukturbauteil in der Entwurfsphase zu dimensionieren.

2.1.3 Systematische Entwicklung keramischer Bauteile und Baugruppen

Die Einbindung von keramischen Komponenten in ein Produkt erfordert nicht nur die mechanische Auslegung des einzelnen Strukturbauteils, sondern es ist auch notwendig, die gesamte Baugruppe oder die gesamte Anwendung zu betrachten, um eine erfolgreiche Substitution von Bauteilen durchzuführen. Neben einer fertigungsgerechten Konstruktion müssen die Einsatzbedingungen, die Einbausituation und die tatsächliche Funktion des Werkstoffes im Anwendungskontext näher betrachtet werden.

Eine solche bauteilübergreifende Entwicklung mit keramischen Komponenten wird in [ALB05], [ALB10A] und [ALB10B] vorgestellt. Hier wird eine herkömmliche Kupplung mit neuartigen, keramischen Reibbelägen ausgestattet. Die geometrischen Abmessungen der keramischen Elemente sowie die Verbindungstechnik werden während des Konstruktionsprozesses verändert. Es finden mehrere Iterationsschritte statt, um eine optimale Bauteilgeometrie zu finden. Hierbei wird jedoch nicht ersichtlich, welche Entscheidungskriterien zu der Optimierung geführt haben, und es fehlen die Bewertungskriterien für die abschließende Konstruktion. Eine allgemeingültige Systematik zur Entwicklung von Produkten mit keramischen Bauteilen wird nicht abgeleitet.

Die erfolgreiche Substitution eines Gummi-Metall-Lagers durch ein keramisches Gleitlager aus Siliziumcarbid wird in [KOCH98] aufgezeigt. Auch hier wurde Schrittweise die ursprüngliche metallische Bauweise in eine Keramik-Metall-Verbundkonstruktion umgewandelt. Den Einsatz von Rohren und Wärmetauschern aus dem hoch thermisch leitenden Siliziumcarbid

mit entsprechenden Anschlussflanschen wird in [NIT08] vorgestellt. Auch dieses Bauteil ist wieder als Metall-Keramik-Verbundkonstruktion ausgeführt.

Wie im Eingangskapitel erwähnt, führten viele Entwicklungen aus keramischen Werkstoffen in den neunziger Jahren zu schweren Versagensfällen, oder sie konnten sich trotz erfolgreicher technischer Entwicklung auf dem Markt aufgrund des hohen Kostendrucks nicht durchsetzen. Es wurden oft nur einzelne Komponenten von metallischer Ausführung in keramische Ausführung überführt, ohne die übergreifende Baugruppe oder die einzelnen Teilfunktionen zu betrachten.

Die Diskrepanz zwischen Konstruktionswissen und Einsatzpotenzial wird in Zimmermann für den Einsatzbereich der Antriebstechnik wie folgt beschrieben [ZIM06]: „ *Die hohe Steifigkeit und die guten tribologischen Eigenschaften der Keramik bieten hier Standzeitverbesserungen und ermöglichen höhere Flächenpressungen im Eingriff der Zahnräder. Die Anwendung von technischen Keramiken reichen vom Gleit- und Wälzlagerbereich, über amagnetische Bauteile in induktiven Bereichen bis hin zum Einsatz als reiner Isolator für elektrischen Strom oder Wärme. Wird den Eigenschaften dieser Keramik-Werkstoffe Rechnung getragen und bereits in der Konstruktion keramikgerecht entworfen, haben diese großen Leistungsreserven zu bieten, die offensichtlich noch nicht in allen Bereichen der Technik bekannt sind.*“

Abschließend kann festgestellt werden, dass eine Neuentwicklung mit technischer Keramik nur marktfähig ist, wenn die technische Wertigkeit des neuen Produkts wesentlich höher ist als die altbewährte Lösung. Da der Entwicklungs- und Fertigungsaufwand von keramischen Bauteilen immer über denen von Metallen liegen wird, muss der technische Vorteil innerhalb des Entwicklungsprozesses betrachtet und bewertet werden, um den Erfolg einer Entwicklung keramischer Komponenten zu gewährleisten.

2.2 Belastungen und Beanspruchungen

Als Strukturbauteile versteht man jene Bauteile, die bei technischen Anwendungen eine mechanische Funktion übernehmen. Damit unterliegen diese Bauteile mechanischen, thermischen, tribologischen sowie chemischen Beanspruchungen. Wie im historischen Abriss über die Entwicklung von keramischen Bauteilen gezeigt, ist der Einsatz solcher Strukturbauteile unter hoher Beanspruchung relativ jung. Bei der Auslegung solcher Bauteile muss darauf geachtet werden, dass die Beanspruchbarkeit des Werkstoffes größer ist als die im Betrieb auftretende Beanspruchung. Bei der mechanischen Auslegung von Strukturbauteilen läuft dieses auf einen Vergleich zwischen den auftretenden Spannungen und den für den jeweiligen Werkstoff zulässigen Spannungen hinaus.

$$\sigma_{\text{zulässig}} > \sigma_{\text{Anwendung}} \quad \{1\}$$

Es findet somit ein zahlenmäßiger Vergleich zwischen zwei skalaren Größen statt, die beide jedoch einer Streuung unterliegen. Mit zunehmender Rechenleistung und genaueren Kenntnissen über das Werkstoffverhalten sowie der Betriebslastmessungen hat sich daher in der Betriebsfestigkeit ein probabilistischer Ansatz etabliert, der die Streuungen innerhalb des Belastungskollektives sowie des Werkstoffes berücksichtigt.

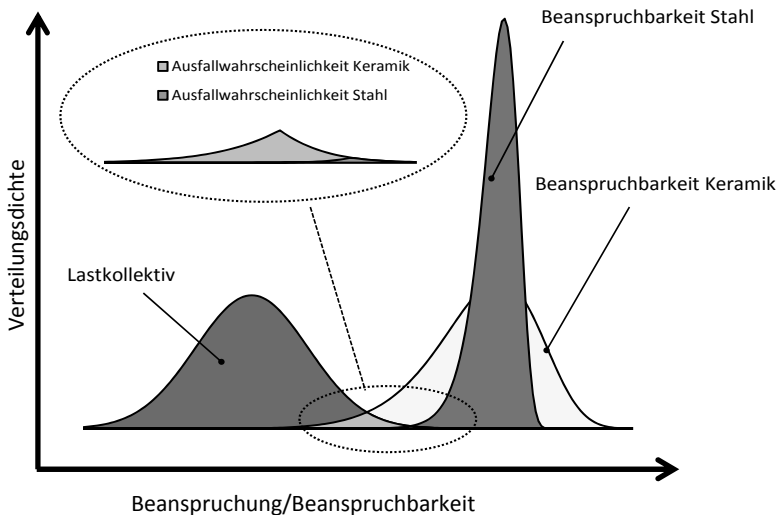


Bild 2: Streuung der Beanspruchbarkeit (Keramik und Stahl) und Beanspruchungskollektiv

In Bild 2 ist die Beanspruchbarkeit der Werkstoffe Stahl und Keramik ($\sigma_{zulässig}$) in einer Verteilungsdichtefunktion aufgetragen. Dazu ist die Verteilung der Beanspruchung ($\sigma_{Anwendung}$) angegeben. Für die ausgewiesene Schnittfläche der beiden Verteilungsdichtefunktionen gilt $\sigma_{zulässig} < \sigma_{Anwendung}$. Sie gibt die Ausfallwahrscheinlichkeit des Bauteils an.

Beanspruchbarkeit

Die Streuung des Werkstoffes ist von der Qualität, dem Fertigungsverfahren und der Werkstoffart abhängig. Die Streuung kann in Festigkeitsuntersuchungen am Werkstoff ermittelt werden. Während bei keramischen Bauteilen von einer weibullverteilten Festigkeitsstreuung ausgegangen wird, werden die Kennwerte metallischer Bauteile meist unter Annahme einer Normalverteilung ermittelt. Neuere Veröffentlichungen aus der Bruchmechanik

berücksichtigen jedoch auch bei metallischen Werkstoffen eine weibullverteilte Festigkeit. Auf die Verteilungen und Analogien wird in späteren Kapiteln näher eingegangen.

Beanspruchung

Bei Betriebsfestigkeitsauslegungen wird von zeitlich veränderbar auftretenden Lasten (dynamischen Lasten) ausgegangen. Es wird ein physikalisches Lastkollektiv zugrunde gelegt. Auch bei statischen Festigkeitsauslegungen ist die Lastannahme mit Unsicherheiten behaftet. Diese werden bisher mit Sicherheitsfaktoren berücksichtigt, durch genauere Berechnungsverfahren und Abschätzung der Wahrscheinlichkeit für verschiedene Lastannahmen kann jedoch auch hier eine Verteilungsfunktion für die Beanspruchung angenommen werden.

Bei den Auslegungskonzepten der Betriebsfestigkeit unterscheidet man zwischen dauerfester Auslegung, bei der die Betriebsspannungen unterhalb der Dauerfestigkeit liegen, und der betriebsfesten Auslegung, bei der sowohl die Lastannahmen, also Betriebsspannung $\sigma_{Anwendung}$ und Verweildauer $t_{Anwendung}$ (oft Lastkollektive aus Betriebsmessungen), als auch die Festigkeitswerte $\sigma_{zulässig}$ einer statistischen Verteilung unterliegen. Über einen Zufallsgenerator werden Werte aus diesen einzelnen Verteilungen miteinander verknüpft (Monte-Carlo-Simulation) [zum Beispiel in TRÄ10]. Durch vielfachen Durchlauf dieser Simulation erhält man eine statistisch verteilte Lebensdauer für das Bauteil. Als Auslegungskriterium gilt hierbei nicht mehr der einzelne Vergleichswert, sondern es wird nach Ermittlung des Streubandes eine zumutbare Ausfallwahrscheinlichkeit festgelegt. Eine hundertprozentige Sicherheit für ein Strukturbauteil ist unter Annahme einer vorhandenen Streuung (normalverteilt oder weibullverteilt) nicht möglich ist, da die Verteilungsfunktionen asymptotisch gegeneinander auslaufen. Die Schnittfläche zwischen Beanspruchung und Beanspruchbarkeit wird damit immer größer als Null werden. Typische zulässige Ausfallwahrscheinlichkeiten liegen bei $P = 10^{-4}$.

Keramische Bauteile werden aufgrund der hohen Werkstoffstreuung schon immer probabilistisch ausgelegt. Eine Einbeziehung von keramischen Werkstoffen in eine Richtlinie zur probabilistischen Auslegung von Strukturbauteilen ist daher sinnvoll. In den folgenden zwei Unterkapiteln werden die Auslegungsmethoden für metallische und keramische Bauteile daher vorgestellt und miteinander in Beziehung gesetzt. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Beanspruchbarkeit der unterschiedlichen Werkstoffe. Die Unsicherheiten bei der Lastannahme sind dagegen nicht Bestandteil dieses Abschnittes. Zur Ermittlung von Lastkollektiven bei dynamischen Betriebslasten wird auf die gängige Grundlagenliteratur verwiesen [HA106].

2.2.1 Allgemeine Grundlagen des Festigkeitsnachweises

Gemäß [SAN08] wird zwischen *statischem Festigkeitsnachweis* und *Dauerfestigkeitsnachweis* unterschieden. Diese Unterscheidung findet sich auch in der Richtlinie des „Rechnerischen Festigkeitsnachweis für Maschinenbau“ [FKM03] wieder. Der Dauerfestigkeitsnachweis wird hier unter der Bezeichnung „Ermüdungsfestigkeitsnachweis“ behandelt. Man unterscheidet weiter zwischen dem *Nennspannungskonzept* und dem *örtlichem Spannungskonzept*. Während das Nennspannungskonzept nur für einfache Bauteile angewandt wird (stabförmig oder flächenförmig), ist bei volumenförmigen Bauteilen das örtliche Spannungskonzept zu wählen.

Die hier angeführten Festigkeitsrichtlinien gelten jedoch nur für Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffe, die Vorgehensweise nach dem örtlichen Spannungskonzept kann jedoch auf alle isotropen Werkstoffe angewendet werden. Auch die Betrachtung der statischen Festigkeit und der Ermüdungsfestigkeit ist generell auf jedes Bauteil beliebigen Werkstoffs übertragbar. Wie später gezeigt, wird inzwischen davon ausgegangen, dass neben der häufig verwendeten statischen Auslegung gerade für neuere keramische Werkstoffe, die zu duktilerem Verhalten neigen, auch zeitliche und zyklische Ermüdungseffekte berücksichtigt werden müssen. Bisher existieren für den Maschinenbau jedoch keine Auslegungsrichtlinien für solche keramische Strukturbauteile. Auch sind die wenigsten Werkstoffe hinsichtlich ihrer Festigkeit genormt, so dass die Entwicklung einer keramischen Anwendung neben mechanischen und funktionsspezifischen Kenntnissen auch ein erweitertes Werkstoffverständnis vorhanden sein muss. Beispiele für eine solche spitze Auslegung von keramischen Bauteilen wurden in Kapitel 2.1 bereits erwähnt.

Das Brevier „Technisch Keramik“ als Sprachrohr der keramischen Industrie in Deutschland fasst das Vorgehen der Festigkeitsauslegung wie folgt zusammen [BRE98].

„Hersteller und Anwender beurteilen die mechanische Belastbarkeit keramischer Bauteile derzeit auf vier Wegen und zwar

1. *entsprechend der Erfahrung (intuitives Wissen),*
2. *mit der analytischen Berechnung der Spannungsverteilung*
3. *oder der numerischen Berechnung der Spannungsverteilung,*
4. *aber auch mit der Berechnung der Spannungsverteilung und darauf basierend mit der örtlichen Verteilung der Ausfallwahrscheinlichkeit mittels statistischer Methoden.*

Der Aufwand für die Festigkeitsauslegung eines Bauteils steigt von 1. nach 4. an. Gleichzeitig jedoch steigt der Nutzungsgrad der Eigenschaften des Werkstoffs, wodurch u. U. bestimmte technische Lösungen erst möglich werden.

Die Auslegung keramischer Bauteile für die Langzeitanwendung bzw. Ermüdungsbeanspruchung kann nach den gleichen Verfahrensweisen durchgeführt werden. Da jedoch das Versagen dieser Werkstoffe meist auf eine Rissinitiierung und Risswachstumsvorgänge zurückführbar ist, ist besonders die Anwendung der bruchmechanischen Methode in Verbindung mit numerischen Rechenverfahren und statistischen Versagensmodellen zu empfehlen.

Für viele, weniger sensible Anwendungen werden in der Praxis entsprechend intuitivem Wissen und überschlägigen Berechnungen sowohl die Materialien, wie auch die Betriebsbelastungen beurteilt und dementsprechend die Bauteile ausgelegt. Das intuitive Wissen besteht aus der langjährigen Erfahrung mit der Auslegung keramischer Bauteile einerseits und mit dem Betriebsverhalten andererseits. Aus diesen Erfahrungen entstanden einige Grundregeln für die Auslegung von keramischen Werkstoffen (z. B. Druckspannungen un-schädlich, Zugspannungen kritisch, Kerben kritisch, Zwangsspannungen vermeiden etc.). Eine zahlenmäßige Festlegung findet dabei jedoch nicht statt [BRE98].“

Die hier erwähnten numerischen Rechenverfahren und die bruchmechanische Methode werden in den folgenden Kapiteln diskutiert. Die Tatsache, dass der Keramikverband hier keinerlei Quellen nennt und parallel erwähnt, dass viele Bauteile „intuitiv“ ausgelegt werden, zeigt, dass es notwendig ist, das implizite Auslegungswissen der Konstrukteure in explizites Konstruktionswissen zu überführen.

2.2.2 Statischer Festigkeitsnachweis

2.2.2.1 Statischer Festigkeitsnachweis für metallische Strukturen

Der statische Festigkeitsnachweis für metallische Strukturen ist in der FKM-Richtlinie wie folgt beschrieben. Es wird eine Bauteilspannung mit einem zulässigen Werkstoffwert verglichen. Die für das Bauteil ermittelten Spannungswerte müssen kleiner sein als die Werkstoffkennwerte des Bauteils. Das Zusammenwirken der Kennwerte auf den Festigkeitsnachweis ist in *Bild 3* zu sehen.

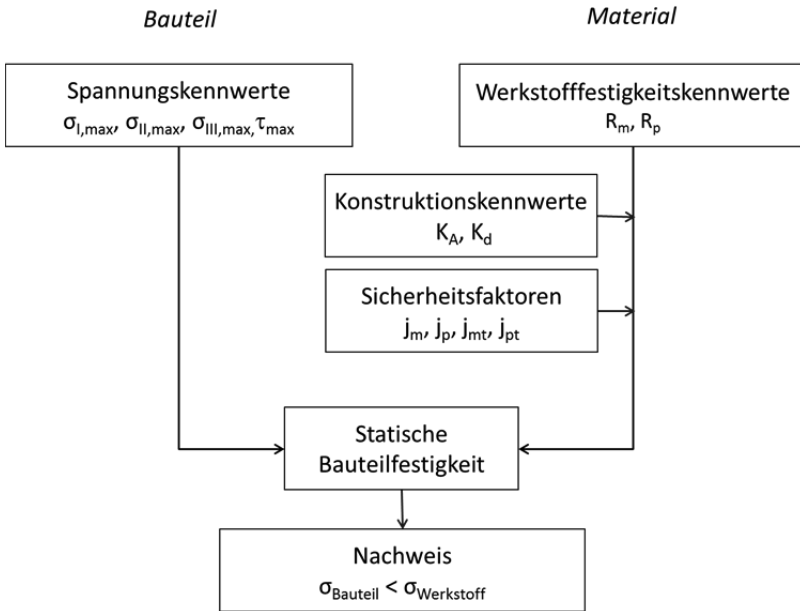


Bild 3: Statische Bauteilfestigkeit nach FKM-Richtlinie (angelehnt an [FKM03])

Werkstoffkennwerte

Alle Werkstoff-Festigkeitskennwerte gelten für die Werkstoffprobe. Es sind Normwerte, Bauteilwerte und Bauteilnormwerte zu unterscheiden. Die Normwerte sind die direkt an einer nichtgekerbten polierten Rundprobe mit einem Normdurchmesser von $d_0 = 7,5 \text{ mm}$ ermittelte Zugfestigkeit $R_{m,N}$ bzw. Fließgrenze $R_{p,N}$ bei einer Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\bar{0}} = 97,5\%$. Die Bauteilwerte gelten direkt für den effektiven Durchmesser des Bauteils d_{eff} , die Bauteil-Normwerte dagegen werden aus den Normwerten ermittelt, indem die Normwerte um einen technologischen Größenfaktor K_d sowie einem Anisotropiefaktor K_A korrigiert werden, so dass für die Zugfestigkeit gilt:

$$R_{m,Bauteil} = K_d \cdot K_A \cdot R_{m,N} \quad \{2\}$$

Der Größeneinfluss K_d berücksichtigt die mit zunehmender Bauteilabmessung im Allgemeinen abnehmende Werkstofffestigkeit. Auf diesen technologischen Größeneinfluss wird später noch einmal genauer eingegangen, da er sich aus unterschiedlichen Einflüssen zusammensetzt und bei keramischen Werkstoffen über das effektive Volumen bzw. die effektive Oberfläche gerechnet wird.

Spannungskennwerte

Für volumenförmige Bauteile ist im allgemeinen Fall mit dem örtlichen Spannungskonzept zu rechnen. Nach Kapitel 3 [FKM03] müssen bei volumenförmigen nichtgeschweißten Bauteilen die Hauptnormalspannungen (Zug oder Druck) in den Richtungen 1,2 und 3 berücksichtigt werden. Die extremen Maximalspannungen sind $\sigma_{I,max}$, $\sigma_{II,max}$, $\sigma_{III,max}$ (in FKM-Richtlinie mit zusätzlichem Index „ex“ und arabischen Ziffern).

Konstruktionskennwerte

Die Konstruktionskennwerte berücksichtigen über die plastische Stützzahl den Einfluss der Spannungsverteilung infolge Belastung und Bauteilform. Hierbei wird das Spannungsgefälle berücksichtigt, dass im Bauteil herrscht. Bei duktilen Bauteilen findet eine Stützwirkung statt, bei der durch plastisches Fließen an der hohen Spannungskonzentration der umliegende Werkstoff, der unter geringerer Spannung steht, die nun frei werdende Energie als zusätzliche Spannung aufnehmen kann. Für nichtduktilen Werkstoffe ist dieser Faktor 1, so dass er im weiteren Verlauf dieser Arbeit keine Berücksichtigung findet. Das Gleiche gilt für den Druckfestigkeitsfaktor f_{σ} , da bei keramischen Werkstoffen die Druckfestigkeit und die Schubfestigkeit weit höher liegen als die Zugfestigkeit (hier Bruchfestigkeit), so dass nur die Bereiche mit hoher positiver Hauptnormalspannung berücksichtigt werden sollen.

Sicherheitsfaktoren

Bei der Auslegung wird je nach Schadensfolgen ein zusätzlicher Sicherheitsfaktor vorgesehen, der zwischen 1 und 3 angenommen wird. Bei Funktionen, die das menschliche Leben beeinträchtigen können, werden fallweise auch höhere Sicherheitsfaktoren vorgesehen. Der Sicherheitsfaktor wird in neuester Zeit kontrovers diskutiert. Im neueren, probabilistischen Ansatz soll dieser durch eine Auftrittswahrscheinlichkeit von z. B. $P_A = 10^{-6}$ ersetzt werden, wenn zukünftig sowohl die Lastannahmen, als auch das Werkstoffverhalten über eine statistische Verteilungsfunktion abgebildet werden kann.

2.2.2.2 Statische Auslegung von keramischen Bauteilen

Keramische Bauteile werden üblicherweise sowohl statisch unter Berücksichtigung der statistischen Streuung als auch für eine bestimmte Lebensdauer unter Berücksichtigung des unterkritischen Risswachstums ausgelegt. Man findet - wie bei den Auslegungsrichtlinien des Maschinenbaus - die Unterscheidung zwischen *statischem Festigkeitsnachweis* und *Ermüdungsfestigkeitsnachweis*.

Ein erster Schritt, keramische Strukturbauteile nach Richtlinien des Maschinenbaus auszuliegen, wurde schon in [Krü99] unternommen. Hier wurde das *Nennspannungskonzept* angewendet und ein Kerbfaktor eingeführt, um die Streuung der keramischen Werkstoffe im Spannungsverlauf des Bauteils zu berücksichtigen.

Da das *Nennspannungskonzept* nur auf einfache Bauteile anzuwenden ist und die Vorgehensweise sich auch nicht weiter etabliert hat, wird im Folgenden nur das örtliche Spannungskonzept weiterverfolgt, bei dem auch komplexere Bauteilstrukturen berücksichtigt werden können. Hier wird kein Spannungsvergleich zwischen Bauteil und Werkstoff vorgenommen, sondern es wird unter Annahme einer Werkstofffestigkeit und –streuung eine Ausfallwahrscheinlichkeit ermittelt. Der Nachweis ist in *Bild 4* veranschaulicht.

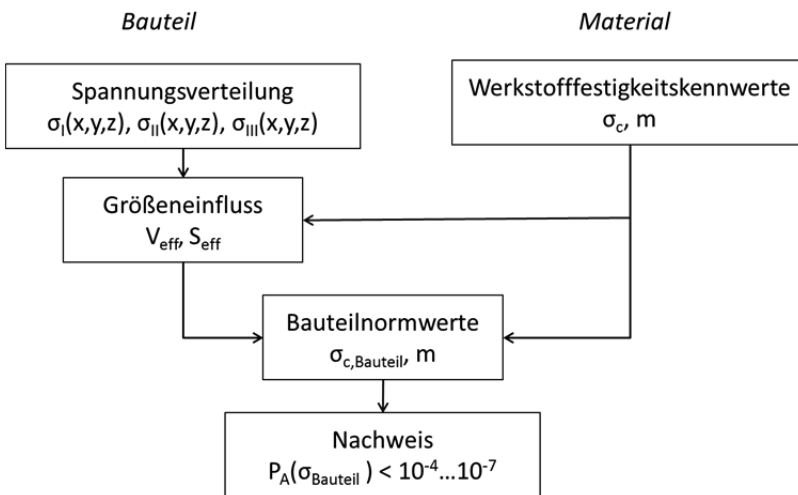


Bild 4: Statischer Festigkeitsnachweis für keramische Bauteile mit örtlichem Konzept

Werkstoffkennwerte

Anders als bei metallischen Werkstoffen wird hier nicht der 97,5%-Wert angegeben, sondern aufgrund der hohen Streuung die gesamte Festigkeitsverteilung als Weibullverteilung

$$\Phi(\sigma, m) = \frac{1}{\sigma_o - \sigma_u} m \left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_o - \sigma_u} \right)^{(m-1)} \exp \left(- \left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_o - \sigma_u} \right)^m \right) \quad \{3\}$$

mit σ als Spannungsvariable, m als Weibullmodul und σ_o, σ_u als obere und untere Spannungskonstante.

Bei keramischen Werkstoffen wird ein Zwei-Parameter-Ansatz nach DIN 843-1 verwendet, bei dem die untere Spannungskonstante $\sigma_u = 0$ gesetzt wird. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung, mit der ein Probekörper unter einer Spannung σ bricht, die sogenannte Ausfallwahrscheinlichkeit, lautet damit für einen bekannten Werkstoff mit Weibullmodul m und einer charakteristischen Bruchfestigkeit σ_c

$$P_A(\sigma) = 1 - \exp \left(- \left(\frac{\sigma}{\sigma_c} \right)^m \right) \quad \{4\}$$

Spannungskennwerte

Das örtliche Spannungskonzept berücksichtigt die tatsächlich vorliegenden dreidimensionalen Spannungswerte. Es werden die Haptnormalspannungen in allen Richtungen 1, 2 und 3 berücksichtigt. Die extremen Maximalspannungen sind.

$$\sigma_{I,max}, \sigma_{II,max}, \sigma_{III,max}$$

Es wird nach der größten im Bauteil auftretenden Spannung ausgelegt. Druckspannungen werden in der Rechnung meistens nur dann berücksichtigt, wenn sie bei der Berechnung zu einem kleineren effektiven Volumen führen, wie im späteren Verlauf noch genauer erläutert wird. Da die ertragbaren Druckspannungen um ein Vielfaches höher liegen als die ertragbaren Zugspannungen, und in Realität nur die Zugspannungen zum Versagen führen, wird der Bereich, der unter Druckspannungen steht, bei der Festigkeitsberechnung meistens vernachlässigt (z. B. in [RUB02]).

In der Literatur dominiert die Aussage, dass „für keramische Werkstoffe ... die Anwendung der Normalspannungshypothese [MAY06]“ zu empfehlen ist. Umfangreiche experimentelle Untersuchungen zum Versagen von Keramik unter mehraxialen Spannungszuständen sind in [SCHIR95] dokumentiert, bei der sich der Bruchverlauf senkrecht zur Normalspannung bestätigt.

Weitere Hinweise zur Gültigkeit der Normalspannungshypothese findet man in [HUF93] und [NOH10]. In anderen Veröffentlichungen (z. B. [SCHEU05], [LIN93]) wird dagegen die Aussage

getroffen, dass es sinnvoll ist, den Schubspannungsanteil höher zu bewerten (Kriterium nach Richard [RICH85]).

Normalspannungshypothese

Bei der Normalspannungshypothese (auch NAVIER-Hypothese genannt) [RIE06] wird die größte Normalspannung für das Versagen verantwortlich gemacht, sie gilt generell für nicht-duktilen Werkstoffe, bei dem ein Spröbruch senkrecht zur Normalspannung auftritt:

$$\sigma_{eq} = \sigma_n \quad \{5\}.$$

Bei der Übertragung der uniaxial ermittelten Spannungskennwerte auf mehraxiale Spannungszustände im Bauteil werden durch Koordinatentransformation der Normal- und Schubspannungen $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ die Hauptnormalspannungen ($\sigma_I > \sigma_{II} > \sigma_{III}$) ermittelt. Bekannt ist diese Transformation im zweidimensionalen Spannungszustand mit [RIE06, Kap 8.5.2]

$$\sigma_I = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \quad \{6\}.$$

Bei der Bildung der Vergleichsspannung wird jedoch nicht einheitlich verfahren.

Hauptspannungshypothese (HNS)

Während die *Hauptspannungshypothese (HNS)* die zusätzlich wirkenden Spannungen nicht berücksichtigt

$$\sigma_{eq,HS} = \sigma_I \quad \{7\}$$

wird in der FKM-Richtlinie durch zusätzliche Einbeziehung der Gestaltänderungshypothese die Mehraxialität, sowie zusätzlich wirkende Schubspannungen über einen Faktor q (s. Tab. 4.6.1 [FKM03]) berücksichtigt, der jedoch nicht für Keramiken anwendbar ist.

Mit einer bekannten Werkstoffstreuung erhält man eine Ausfallwahrscheinlichkeit von

$$P_A(\sigma_I) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\sigma_I}{\sigma_c}\right)^m\right) \quad \{8\}.$$

Da das tatsächlich beanspruchte Volumen des Bauteils meistens größer ist als das des Probekörpers, wird über den Spannungsverlauf des Bauteilvolumens bzw. der Bauteiloberfläche integriert und mit der charakteristischen Bruchspannung σ_0 und dem normierten Volumen V_0 respektive der normierten Oberfläche S_0 in Relation gesetzt.

$$P_{A,Bauteil} = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\sigma_I}{\sigma_0}\right)^m \frac{dV}{V_0}\right) \quad \{9\}$$

respektive

$$P_{A,Bauteil} = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\sigma_I}{\sigma_0}\right)^m \frac{dS}{S_0}\right) \quad \{10\}.$$

Principle of Independent Action (PIA)

Für keramische Werkstoffe wird im englischsprachigen Raum eine Vergleichsspannung nach dem „principle of independent action“, die sogenannte PIA, gebildet (z. B. [DAN07], [JAK94])

$$\sigma_{eq,PIA} = \sqrt[m]{\sigma_I^m + \sigma_{II}^m + \sigma_{III}^m} \quad \{11\}.$$

Die Ausfallwahrscheinlichkeit ergibt sich dann zu

$$P_{A,Bauteil} = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\sigma_I^m + \sigma_{II}^m + \sigma_{III}^m}{\sigma_c^m}\right)\right) \quad \{12\}.$$

Berücksichtigt man zusätzlich das beanspruchte Bauteilvolumen bzw. die Bauteiloberfläche, so erhält man

$$P_{A,Bauteil} = 1 - \exp\left(-\int \left(\frac{\sigma_I^m + \sigma_{II}^m + \sigma_{III}^m}{\sigma_0^m}\right) \frac{dV}{V_0}\right) \quad \{13\}$$

respektive

$$P_{A,Bauteil} = 1 - \exp\left(-\int \left(\frac{\sigma_I^m + \sigma_{II}^m}{\sigma_0^m}\right) \frac{dS}{S_0}\right) \quad \{14\}.$$

Im deutschsprachigen Raum wird die Mehrdimensionalität der Belastung mit Hilfe der Integration über dem Raumwinkel berücksichtigt (z. B. [FET06], [BRUE93]). In diesem Ansatz wird die Spannung lokal zur statistisch verteilten Risslage betrachtet. Die grundsätzlichen mechanischen Zusammenhänge, die auf der Weibull-Theorie (1934) sowie den Arbeiten zur Mehraxialität von Evans, Lamon und Batdorf (1974-1978) basieren, sind in [AND94] ausführlich zusammengefasst. Diese beinhalten eine Integration über den Raumwinkel, um die Risslage bei der Betrachtung des Spannungszustands im Bauteil zu berücksichtigen. Es gilt unter Annahme des Normalspannungsversagens dann für die Vergleichsspannung eine Abhängigkeit zum Risswinkel [AND94].

Rissabhängige Normalspannungshypothese (NSmR)

$$\sigma_{eq,NSmR}(\varphi, \vartheta) = (\sigma_I \cos^2(\varphi) + \sigma_{II} \sin^2(\varphi)) \cos^2(\vartheta) + \sigma_{III} \sin^2(\vartheta) \quad \{15\}$$

Von Batdorf wird ein Versagensintegral über den Raumwinkel gebildet, so dass unter Annahme der Normalspannungshypothese gilt

$$I_V(m, \sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III}) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \left((\cos^2(\varphi) + \frac{\sigma_{II}}{\sigma_I} \sin^2(\varphi)) \cos^2(\vartheta) + \frac{\sigma_{III}}{\sigma_I} \sin^2(\vartheta) \right)^m \cos(\vartheta) d\vartheta d\varphi \quad \{16\}$$

Für die Ausfallwahrscheinlichkeit erhält man dann

$$P_{A,Bauteil} = 1 - \exp\left(-\int \left(\frac{\sigma_I}{\sigma_0}\right)^m I_V \frac{dV}{V_0}\right) \quad \{17\}.$$

Für Oberflächenfehler vereinfacht sich das Versagensintegral zu

$$I_S(m, \sigma_I, \sigma_{II}) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left((\cos^2(\varphi) + \frac{\sigma_{II}}{\sigma_I} \sin^2(\varphi)) \cos^2(\vartheta) \right)^m d\varphi \quad \{18\}$$

so dass gilt

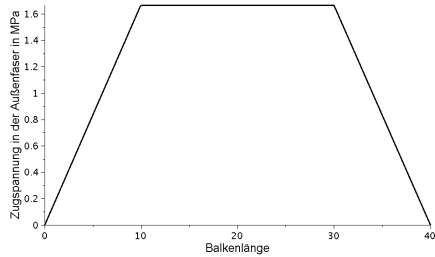
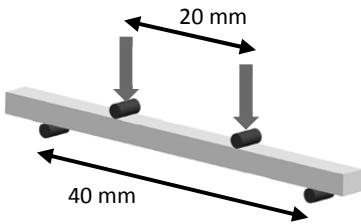
$$P_{A,Bauteil} = 1 - \exp\left(-\int \left(\frac{\sigma_I}{\sigma_0}\right)^m I_S \frac{dS}{S_0}\right) \quad \{19\}.$$

Sowohl für die **PIA**, die Hauptnormalspannung ohne Riss (**HNS**), als auch für die risslagenabhängige Integration über den Raumwinkel (**NSmR**) existieren Auswertungsroutinen (STAU, CARES und WEIBULL), mit denen die Bauteilspannungen aus der FEA nachträglich ausgewertet werden. Mit beiden Auslegungshypothesen wird derzeit ausgelegt. Die Unterschiede dieser Anwendungen wurden in [SPei00] für den zweidimensionalen Spannungszustand dargestellt, es wird jedoch noch kein direkter Bezug auf die Bauteilauslegung hergestellt. In Kapitel 4 dieser Arbeit wird daher der Einfluss der Hypothesenwahl auf die Auslegung ausführlicher analysiert und unter verschiedenen dreidimensionalen Spannungszuständen näher untersucht.

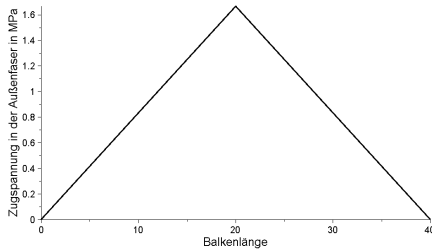
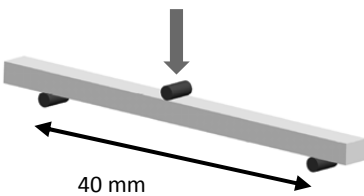
Werkstoffkennwerte

Da Zugproben aus keramischen Werkstoffen sehr anfällig für Ausrichtungs- und Prüffehler sind, wurden für diese Werkstoffe andere Prüfprozeduren festgelegt, als bei metallischen. Genormt ist der Dreipunkt-, sowie der Vierpunkt-Biegeversuch, die beide als Ergebnis eine charakteristische Bruchspannung σ_c ($P_A = 63,5\%$) sowie eine Streuung m (Weibullmodul) haben [DIN 843-1]. Diese Werkstoff-Festigkeitskennwerte gelten für Biegeproben mit einem Querschnitt von $b \times h = 4 \times 3 \text{ mm}^2$ und einer belasteten Länge von $l = 40 \text{ mm}$, bzw.

größeren Proben mit rundem Querschnitt $d = 10 \text{ mm}$, bzw. eckigem Querschnitt $b \times h = 10 \times 10 \text{ mm}^2$ und einer belasteten Länge von $l = 100 \text{ mm}$ (gem. EN60672-2:2000).



*Bild 5: Spannungsverlauf Vierpunktbiegeversuch bei normierter Kraft
 $F = 1 \text{ N}$, Probenform B*



*Bild 6: Spannungsverlauf Dreipunktbiegeversuch bei normierter Kraft
 $F = 1 \text{ N}$, Probenform B*

In *Bild 5* und *Bild 6* sind die Spannungsverläufe für die beiden Prüfvarianten aufgetragen. Wie aus dem Verlauf sichtbar wird, wird im Vierpunkt-Biegeversuch ein wesentlich größerer Bereich der Probe belastet. Trotzdem werden beide Prüfungen in der Praxis wahlweise angewendet – oft ohne Angabe der Lastaufbringung. Da hier nur einachsige Beanspruchungen auf einem sehr kleinen Volumen aufgebracht werden, haben sich in jüngster Zeit noch andere Prüfmethoden etabliert, bei denen mehraxiale Spannungszustände aufgebracht werden (z. B. die Drei-Ball- und Zwei-Ball-Prüfungen).

Von den verschiedenen Versuchsaufbauten wurde der Doppelringversuch in einer neuen Norm [DIN 51105] festgeschrieben, die erstmalig im Jahre 2008 herausgegeben wurde. Bei den Herstellern findet man jedoch bisher nur die Biegefestigkeitsangaben aus den Dreipunkt- oder Vierpunktbiegeversuchen.

Die Bauteilnormwerte werden aus diesen Biegefestigkeitswerten durch einen Größenfaktor bestimmt, der über das effektive Volumen (V_{eff}) bzw. die effektive Oberfläche (S_{eff})

berechnet wird. Der Zusammenhang wird über die Griffith-Theorie erklärt, es wird daher die Weibullverteilung zugrunde gelegt, so dass theoretisch gilt [MUN01]:

$$\left(\frac{\sigma_c}{\sigma_{c,Bauteil}} \right) = \left(\frac{V_{eff,Bauteil}}{V_{eff,Probe}} \right)^{\frac{1}{m}} \quad \{20\}$$

respektive

$$\left(\frac{\sigma_c}{\sigma_{c,Bauteil}} \right) = \left(\frac{S_{eff,Bauteil}}{S_{eff,Probe}} \right)^{\frac{1}{m}} \quad \{21\}$$

Die umgestellte Gleichung zeigt die Analogie zum FKM-Richtlinie:

Metalle

$$R_{m,Bauteil} = K_d \cdot K_A \cdot R_{m,N} \quad \text{siehe } \{2\}$$

mit K_d als technologischen Größeneinflussfaktor und K_A als Anisotropiefaktor.

Keramik

$$\sigma_{eq,Bauteil} = \left(\frac{V_{eff,Bauteil}}{V_{eff,Probe}} \right)^{\frac{1}{m}} \cdot \sigma_{eq,Probe} \quad \{20'\}$$

$$\sigma_{eq,Bauteil} = \left(\frac{S_{eff,Bauteil}}{S_{eff,Probe}} \right)^{\frac{1}{m}} \cdot \sigma_{eq,Probe} \quad \{21'\}$$

Damit ergibt sich für Keramiken ein Größeneinfluss für Versagen durch Volumenfehler von

$$K_{D,V} = \left(\frac{V_{eff,Probe}}{V_{eff,Bauteil}} \right)^{\frac{1}{m}} \quad \{22\}$$

Für Oberflächenfehler analog

$$K_{D,S} = \left(\frac{S_{eff,Probe}}{S_{eff,Bauteil}} \right)^{\frac{1}{m}} \quad \{23\}.$$

Die effektiven Volumina bzw. Oberflächen lassen sich jeweils unter Annahme einer bestimmten Versagensart und Versagenshypothese unter Einbeziehung von {9} und {10} für die verschiedenen Versagenshypothesen ermitteln.

Hauptnormalspannungshypothese (HNS)

Oberflächenfehler:

$$S_{eff} = \int_S \left(\frac{\sigma_I}{\sigma^*} \right)^m dS \quad \{24\}$$

Volumenfehler:

$$V_{eff} = \int_V \left(\frac{\sigma_I}{\sigma^*} \right)^m dV \quad \{25\}$$

Principle of Independent Action (PIA)

Oberflächenfehler:

$$S_{eff} = \int_S \left(\frac{\sigma_I}{\sigma^*} \right)^m dS + \int_S \left(\frac{\sigma_{II}}{\sigma^*} \right)^m dS \quad \{26\}$$

Volumenfehler:

$$V_{eff} = \int_V \left(\frac{\sigma_I}{\sigma^*} \right)^m dV + \int_V \left(\frac{\sigma_{II}}{\sigma^*} \right)^m dV + \int_V \left(\frac{\sigma_{III}}{\sigma^*} \right)^m dV \quad \{27\}$$

Rissorientierte Normalspannungshypothese (NSmR)

Oberflächenfehler:

$$S_{eff} = \int_S \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(\frac{\sigma_{eq}(\varphi, \vartheta) = (\sigma_I \cos^2(\varphi) + \sigma_{II} \sin^2(\varphi)) \cos^2(\vartheta) + \sigma_{III} \sin^2(\vartheta)}{\sigma^*} \right)^m d\varphi dS \quad \{28\}$$

Volumenfehler:

$$V_{eff} = \int_V \frac{1}{4\pi} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \left(\frac{\sigma_{eq}(\varphi, \vartheta) = (\sigma_I \cos^2(\varphi) + \sigma_{II} \sin^2(\varphi)) \cos^2(\vartheta) + \sigma_{III} \sin^2(\vartheta)}{\sigma^*} \right)^m \cos \vartheta d\vartheta d\varphi dV \quad \{29\}$$

In vielen älteren Literaturstellen wird von Versagen innerhalb des Bauteils ausgegangen, so dass das effektive Volumen V_{eff} als fehlerrelevante Größe verwendet wird. Es zeigt sich jedoch in der Übersicht der Veröffentlichungen, dass davon auszugehen ist, dass bei keramischen Bauteilen überwiegend die Oberflächenfehler als Versagensursprung ausgemacht werden (z. B. in [NOH09], [DAN10] sowie [SCHIR95]). Bei Maschinenbauteilen liegt generell ein mehraxialer Spannungszustand vor. Außerdem treten im Einbauzustand zusätzliche Beanspruchungen auf, die durch Toleranzen, Winkelfehler, Betriebstemperaturen etc. hervorgerufen werden. Kanten- und Lageversatz führen zu einem zusätzlichen Anteil an Biegespannungen, so dass die maximalen Zugspannungen sich einbaubedingt an der Oberfläche des Bauteils befinden. Der Rissursprung wird daher vorrangig im oberflächennahen Bereich des Bauteils zu finden sein.

Sicherheitsfaktoren

Die Auslegung von keramischen Bauteilen wird probabilistisch durchgeführt. Die Lastannahmen werden meistens ohne Toleranzangaben konservativ getroffen, die Werkstofffestigkeit wird unter Annahme einer zugrunde liegenden Weibullverteilung bewertet. Als Ergebnis wird dann eine Ausfallwahrscheinlichkeit für das Bauteil angegeben. Zulässige Ausfallwahrscheinlichkeiten liegen dabei in der Größenordnung von $P_A = 10^{-6}$, was mit der Entwicklung im Maschinenbau, Bauteile über den probabilistischen Ansatz auszulegen, korrespondiert.

2.2.3 Bruchmechanische Grundlagen zum Rissfortschritt

Grundlage der Bruchmechanik ist die Untersuchung des Rissfortschritts bei vorhandenem Riss im Bauteil / Material. Bei einer bekannten Rissgröße (z. B. als Ergebnis aus Inspektionsintervallen eines Bauteils) kann somit bei metallischen Bauteilen eine Restlebensdauer nach Rissinitiationsphase berechnet werden. Dieser Vorgang wird als Ermüdung bezeichnet. Die Betrachtung der Restlebensdauer bei vorhandenem Riss mit bekannter Rissgeometrie wird als bruchmechanischer Festigkeitsnachweis bezeichnet [RICH09]. Üblicherweise sind jedoch die Risse nicht im Einzelnen bekannt, so dass ein spannungsbasierter Festigkeitsnachweis, der sogenannte Ermüdungsfestigkeitsnachweis, geführt wird.

Bei keramischen Werkstoffen wird dagegen üblicherweise nicht von Ermüdung gesprochen. Bei Metallen überwiegen die intrinsischen Mechanismen an der Riss Spitze (plastische Verformung, mechanische Ermüdung), daher wird vorrangig die zyklische Abhängigkeit beim Risswachstum berücksichtigt. Im Gegensatz dazu überwiegen bei den keramischen Werkstoffen die extrinsischen Ermüdungseffekte (Korrosion an der Riss Spitze durch Umgebungsmedium und / oder Kriechen bei höheren Temperaturen) [RIE95], so dass das zeitliche Risswachstum gegenüber dem zyklisch getriebenen Risswachstum überwiegt. Neuere Untersuchungen zum zyklisch induzierten Risswachstum an Al_2O_3 sind in [NEI07] zu finden. Es bestätigt sich der Unterschied zwischen zyklischem und statischem Risswachstum. Die Ursachen hierfür sind jedoch noch nicht hinreichend untersucht. In der Praxis werden Bauteile nach einem zeitlichen Versagen (Lebensdauerberechnung) unter Annahme eines identischen Versagensvorgangs ausgelegt.

Sowohl bei Keramik als auch bei Metallen wird davon ausgegangen, dass beim Bruchvorgang nach einer Phase der Rissinitiation ein quasistationäres Risswachstum eintritt, in der der Riss unterkritisch wächst und bricht, wenn ein kritischer Spannungsintensitätswert $K_{I,C}$ erreicht wird (siehe *Bild 7*).

Man teilt dabei den Rissvorgang in drei Bereiche ein:

- Bereich I: überschreiten eines Threshold-Spannungsintensitätsfaktors $K_{I,th}$ und Rissinitiierung
- Bereich II: kontrollierte Rissausbreitung (unterkritisches Risswachstum)
- Bereich III: unkontrollierte Rissausbreitung bis zum Bruch bei $K_{I,C}$

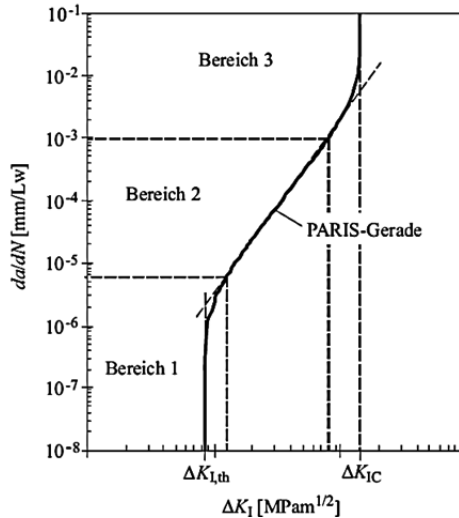


Bild 7: Zusammenhang zwischen der Rissgeschwindigkeit und dem zyklischen Spannungsintensitätsfaktor mittels der da/dN - ΔK_I -Kurve [RICH09]

Der Riss setzt sich demnach abhängig von der anstehenden Spannungsintensitätsamplitude fort. Man unterscheidet unterschiedliche Belastungssituationen, wobei hier vereinfacht nur auf die Modus-I-Belastung (Bild 8) eingegangen wird, da die anderen Moden für das Risswachstum eine untergeordnete Rolle spielen. Für weitere Details der Bruchmechanik wird auf die gängige Literatur verwiesen (z. B. [RICH09]).

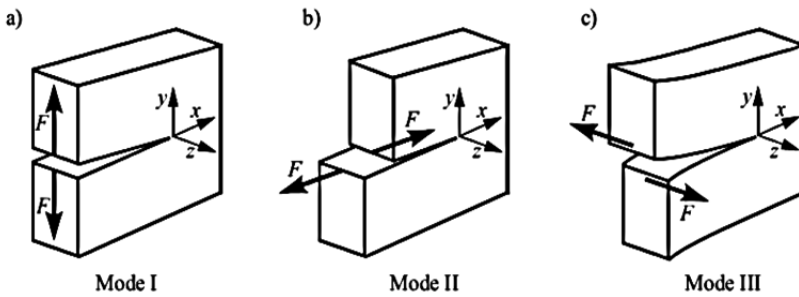


Bild 8: Belastungsmoden am Riss [Rich09]

Der Zusammenhang zwischen dem Spannungsintensitätsfaktor und der Bauteilspannung lautet dabei (reine Mode I - Belastung):

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} Y \quad \{30\}$$

Dabei ist Y der Geometriefaktor des Risses, a ist die Risslänge.

In Bild 9 ist die Spannungsüberhöhung an der Risspitze, die der Spannungsintensitätsfaktor zugrunde liegt, dargestellt.

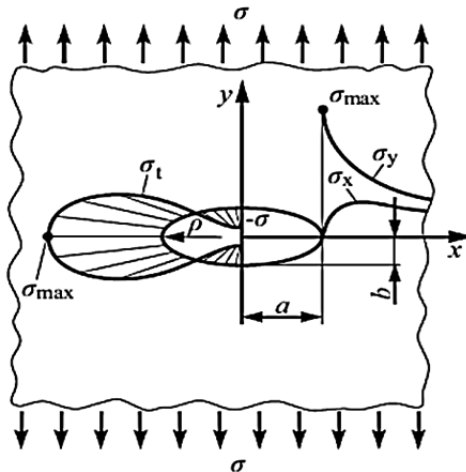


Bild 9: Spannungsverteilung an einer elliptischen Kerbe mit den Halbachsen a und b [Rich09]

Bei der Auslegung von Bauteilen wird jedoch davon ausgegangen, dass ein homogenes Material ohne makroskopische Fehlstellen vorliegt. Damit liegen bei der Konstruktion keine K_I -Werte vor. Soll im Vorfeld ein bruchmechanischer Nachweis geführt werden, wird daher von den maximal auftretenden Spannungen im Bauteil auf diesen K_I -Wert rückgerechnet.

Nach Umstellung von {31} kann dann unter Annahme einer bestimmten Fehlergröße von den berechneten Spannungen auf den Spannungsintensitätsfaktoren umgerechnet werden.

$$\sigma = \frac{K_I}{\sqrt{\pi a Y}} \quad \{30'\}$$

2.2.3.1 Risswachstumsvorgänge bei Metallen

Der bruchmechanische Festigkeitsnachweis bei Metallen wird verwendet, um bei vorhandenen Fehlstellen vorherzusagen, wo und wie schnell sich Risse im Bauteil bilden, und wann sie zum Versagen führen. Dabei werden entweder einzelne Fehlstellen hinsichtlich ihres Spannungsintensitätsfaktors im Betriebszustand betrachtet (Restlebensdauerbestimmung), oder es wird eine probabilistische Fehlerverteilung vorausgesetzt. Diese Voraussetzung wird oft gekoppelt an eine zerstörungsfreie Prüfung des Bauteils, mit der Risse, die größer als die angenommenen sind, empirisch ausgeschlossen werden.

Die wesentlichen Auslegungsroutinen sind in der FKM-Richtlinie „Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis für Maschinenteile“ [FKM03] zusammengefasst. Wesentlicher Bestandteil der Richtlinie ist die Bestimmung des Rissfortschritts nach der linear-elastischen Bruchmechanik (LEBM). Dabei werden folgende zwei Gleichungen zugrunde gelegt:

- Wenn die Spannungsintensitätsamplitude unterhalb einen Threshold-Wertes $K_{I,th}$ liegt, breitet sich der Riss nicht aus:

$$\Delta K_I < \Delta K_{I,th} \quad \{31\}$$

- Wenn die Threshold-Wert überschritten ist, wird eine Rissfortschrittsgleichung angenommen, z. B. die Paris-Erdogan-Gleichung [San08]:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K_I^n \quad \{32\}$$

Hierbei steht a für die Risslänge, N die Zyklenzahl, C ist eine Risskonstante, n die Steigung der Paris-Geraden (Risswachstumsexponent) und ΔK_I die Spannungsintensitätsamplitude.

2.2.3.2 Risswachstumsvorgänge bei Keramiken

Bei keramischen Werkstoffen werden bei der Auslegung meist nur die extrinsischen Ursachen berücksichtigt. Unter Einfluss von Temperatur und Umgebungsmedium ändert sich die Risswachstumsgeschwindigkeit (Reaktionskinetik) und eine zeitliche Abhängigkeit zwischen Spannungsintensitätsfaktor und Risswachstum wird zugrunde gelegt (siehe *Bild 10*).

Analog zur Paris-Erdogan-Gleichung gilt hier im Bereich II (s. z. B. [MUN01]):

$$v = \frac{da}{dt} = A \cdot K_I^n \quad \{33\}$$

mit v als Rissfortschrittsgeschwindigkeit

Während bei Metallen die Spannungsintensitätsamplitude ΔK_I als ausschlaggebende Größe gewählt wird, geht man bei keramischen Werkstoffen von einer absoluten kritischen Spannungsintensität $K_{I,c}$ aus. Über diese Gleichung wird bei bekannter Rissgeometrie das Risswachstum sowie der Versagenszeitpunkt bestimmt. Die hier aufgeführte Bruchmechanik ist Grundlage für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis im folgenden Kapitel.

Der in Gleichung {33} eingeführte Risswachstumsexponent n von Keramik ist aufwendig zu bestimmen und gehört nicht zu den Standardprüfungen der Hersteller. Einerseits wird viel Zeit benötigt, um auch langsame Spannungsrampen aufbringen zu können, andererseits ist die Streuung bei den Messungen hoch, wie Ringversuche zeigen, die Messungen verschiedener Institute miteinander verglichen haben [FET00]. Die Parameterbestimmung erfolgt üblicherweise nach DIN EN 843-3. Der 4-Punkt- bzw. 3-Punkt-Biegeversuch wird mit unterschiedlichen Belastungsraten durchgeführt. Wenn der Werkstoff zu unterkritischem Risswachstum neigt, erhält man bei langsamerer Beanspruchung eine niedrigere Bruchfestigkeit, da während der Beanspruchungszeit unterkritisches Risswachstum stattgefunden hat.

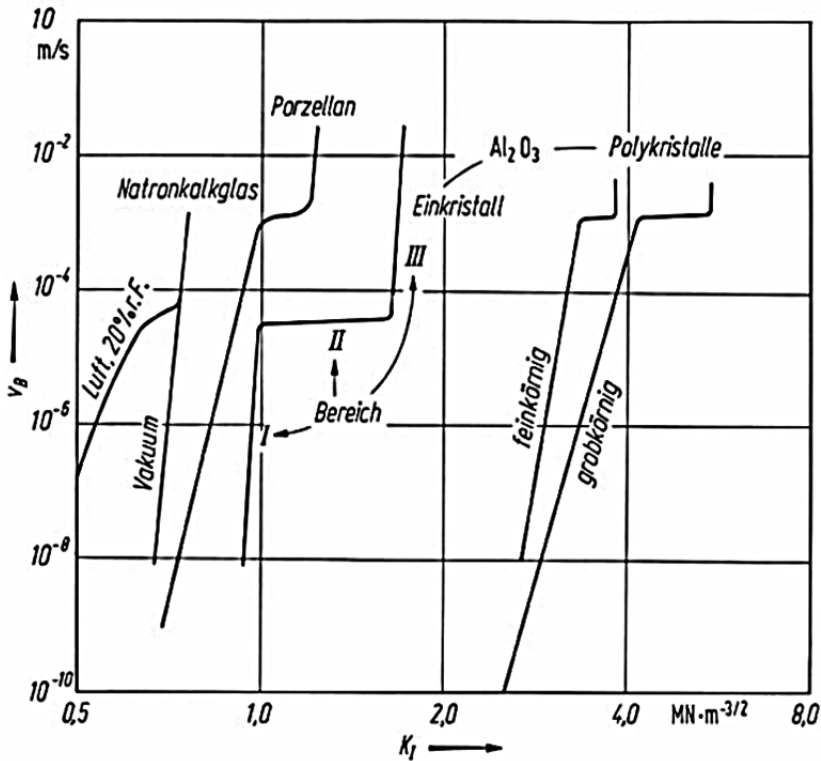


Bild 10: Abhängigkeiten der Bruchgeschwindigkeit unterschiedlicher Keramiken $v = da/dt$ vom Spannungsintensitätsfaktor K_I [SAL07]

Nach logarithmischem Auftragen der Bruchspannung über der Spannungsrate kann der Risswachstumsexponent n ermittelt werden. Je steiler die Ausgleichsgerade, desto höher ist das unterkritische Risswachstum ausgeprägt. In Bild 11 sind als Beispiel Messungen an Zirkonium-verstärktem Aluminiumoxid [RAM11] zu sehen.

In [FET00] werden die im Rahmen eines Ringversuchs in verschiedenen Instituten ermittelte Risswachstumsexponenten miteinander verglichen. Es zeigt sich, dass die Streuung zum Teil sehr hoch ausfällt. Die Werte aus [FET00] sind in Tabelle 2 mit aufgeführt.

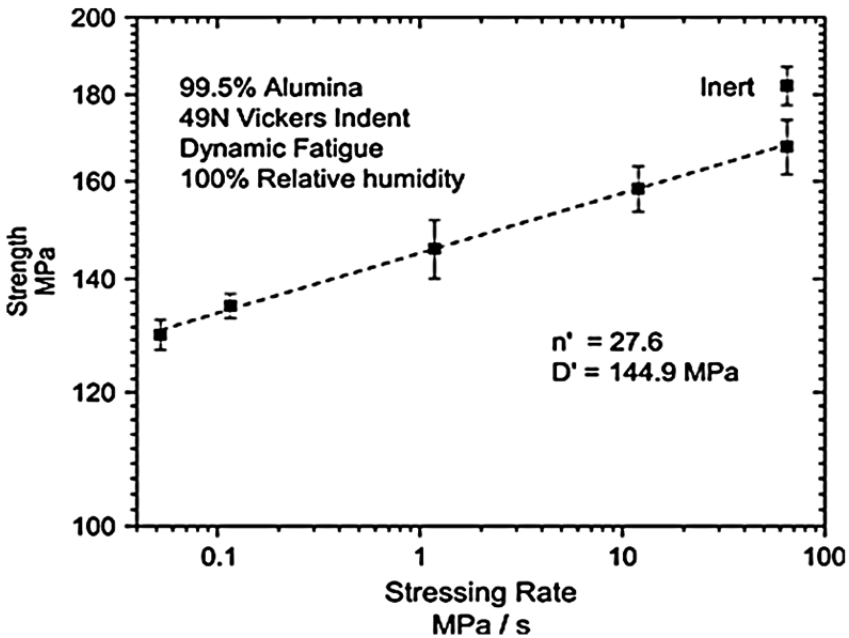


Bild 11: Bruchfestigkeiten unterschiedlicher Spannungsraten [RAM11]

Der Risswachstumsexponent n ist keine genormte Werkstoffgröße, die man in Tabellenwerken nachschlagen kann. Sie ist neben der chemischen Zusammensetzung des Grundwerkstoffes abhängig von der Korngröße, sowie den Fertigungsparametern des Probekörpers oder Bauteils. Da die Wahl des Exponenten n bei der Auslegung der Bauteile einen exponentiellen Einfluss hat, sind die Ergebnisse immer mit einem entsprechenden Streuband zu versehen, was die Aussagekraft der eigentlichen Auslegung schmälert. Weiterhin sagt die DIN EN 843-3 aus, dass „bei geringen Spannungsintensitätsfaktoren ... kein unterkritisches Risswachstum auftreten (kann). Dieses wird als Schwelle des unterkritischen Risswachstums oder als ‚Ermüdungsgrenze‘ bezeichnet“. Die Ermittlung eines solchen Grenzwertes ist jedoch nicht Bestandteil der Norm, so dass für die wenigsten keramischen Werkstoffe ein unterer Wert $K_{I,th}$ bekannt ist.

2.2.3.3 Vergleich des Risswachstums bei Metall und Keramik

Um die unterschiedlichen Betrachtungsweisen bei Keramik und Metallen zu vereinen, hat Ritchie (z. B. [Rit94], [Rit99], [Gil95], [Gil00], [Dau89]) umfangreiche Untersuchungen

durchgeführt, um sowohl intrinsisch, als auch extrinsische Ursachen für das Risswachstum zu identifizieren.

Die unterschiedlichen intrinsischen und extrinsischen Verstärkungsmechanismen am Riss sind *Bild 12* gezeigt [RIT03]. In [RIT94] wurde der Rissfortschritt an Whisker-verstärktem SiC unter zyklischer Beanspruchung gemessen und über die Amplitude ΔK_I , sowie alternativ über den maximal $K_{I,c}$ -Wert aufgetragen.

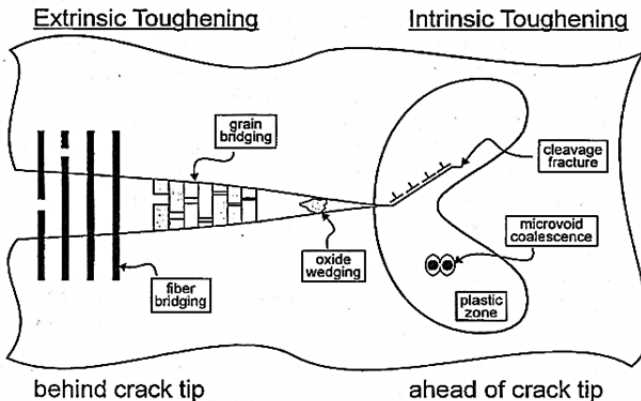


Bild 12: Schematische Veranschaulichung zwischen intrinsischen und extrinsischen Mechanismen am Riss [RIT03]

Es bestätigt sich, dass der Maximalwert $K_{I,c}$ die treibende Größe beim zyklisch indizierten Rissfortschritt ist. Es wird vorgeschlagen, in der Beschreibung des Rissfortschritts sowohl den Einfluss die Amplitude ΔK_I , als auch des Maximalwert $K_{I,c}$ in die Betrachtung einzubeziehen. Die beide Faktoren vereine Formel lautet:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (K_{I,c})^q \cdot (\Delta K_I)^p \quad \{34\}$$

Dabei ergibt die Summe der Exponenten den Risswachstumsexponenten n

$$q + p = n \quad \{35\}.$$

Für SiC-verstärktes Aluminiumoxid erhält er mit $q \approx 10$ und $p \approx 5$ ($n=15$) ein umgekehrtes Verhältnis wie für metallische Ermüdung bei hochlegiertem Nickelstahl ($q = 0,4$ und $p = 3$; $n=3,4$) festgestellt wurden. Dieses zeigt zum einen, dass der Risswachstumsexponent n bei Keramiken wesentlich höher liegt, zum anderen, dass bei duktilen Metallen die Spannungsintensitätsamplitude ΔK_I eher rissstreibend ist, während bei Keramiken der absolute Span-

nungsintensitätswert $K_{I,c}$ ausschlaggebend ist. In den Versuchen von [NEJ07] bestätigt sich dieses Verhalten. Übereinstimmende Ergebnisse findet man bei Fett. In [FET98] werden Vergleichsmessungen publiziert, in denen die Formel {35} auf die Ergebnisse verschiedener schwellige und wechselnde Belastungszustände angewendet wird. Die zyklische Abhängigkeit des Rissfortschritts in Keramik wird in [FET91] bestätigt.

Eine Zusammenstellung des zyklisch induzierten Rissfortschritts bei unterschiedlichen Keramiken und Metall findet sich bei Gilbert (siehe *Bild 13*).

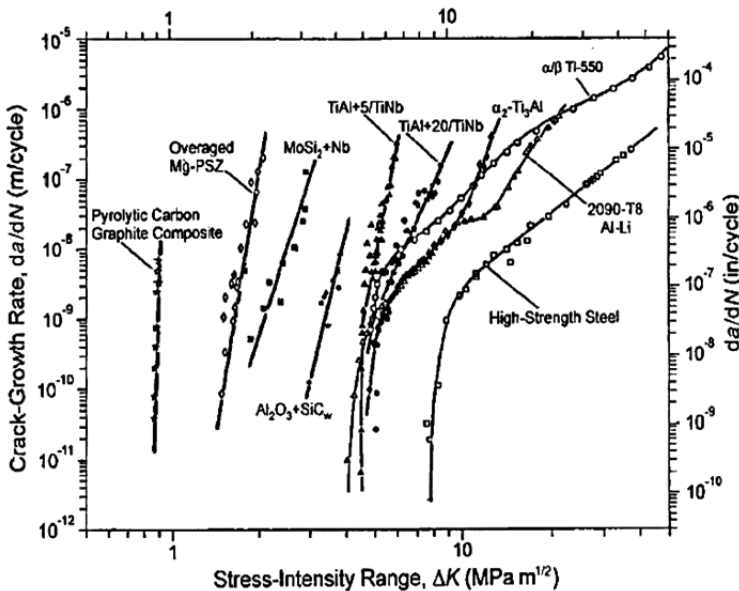


Bild 13: Vergleich des zyklisch induzierten Rissfortschritts bei unterschiedlichen Keramiken und Metall [Gil00]

Ein wesentlicher Unterschied in der Betrachtung des Risswachstums bei metallischen respektive keramischen Werkstoffen ist die sehr unterschiedliche Dimension. In der folgenden Tabelle sind jeweils Risswachstumsexponenten n sowie $K_{I,c}$ -Werte und typische Risslängen für verschiedene Werkstoffe aufgetragen. Hier wird ersichtlich, dass ein Unterschied von ein bis zwei Größenordnungen besteht.

Die bruchmechanischen Konstanten n und $K_{I,c}$ hängen jedoch nicht nur vom keramischen Grundwerkstoff sondern auch von der absorbierten Energie ab, die zusätzlich zur spezifischen Bruchenergie während der Rissbildung für den Rissfortschritt aufgebracht werden

muss. Ursache für eine erhöhte Risserweiterungskraft sind Rissverzweigungen, Einflüsse von Verunreinigungen sowie Korngrenzen. So ist die spezifische Bruchenergie bei Polykristallen wesentlich höher als bei Einkristallen. Diese risswachstumsverzögernden Effekte werden bei der Werkstoffentwicklung gezielt eingesetzt, um die spezifische Bruchenergie zu erhöhen, um damit das spröde Verhalten zu mildern, z. B. bei der Entwicklung sehr feinkörniger polykristalliner Keramik mit anisotropen Eigenschaften, oder auch durch gezielten Einbau einer zweiten Phase (z. B. zirkoniumverstärktes Aluminiumoxid) [SAL07].

Die Effekte der Risswachstumsverzögerung können über sogenannte R-Kurven-Messungen empirisch bestimmt werden. In diesen Kurven wird die Änderung des Spannungsintensitätsfaktors in Abhängigkeit der Risslänge aufgetragen. Mit Hilfe dieser Messungen können neu entwickelte keramische Werkstoffe qualitativ miteinander verglichen werden. In *Bild 14* ist eine solche R-Kurve für Siliziumnitrid SL200 aus [FÜN10] gezeigt.

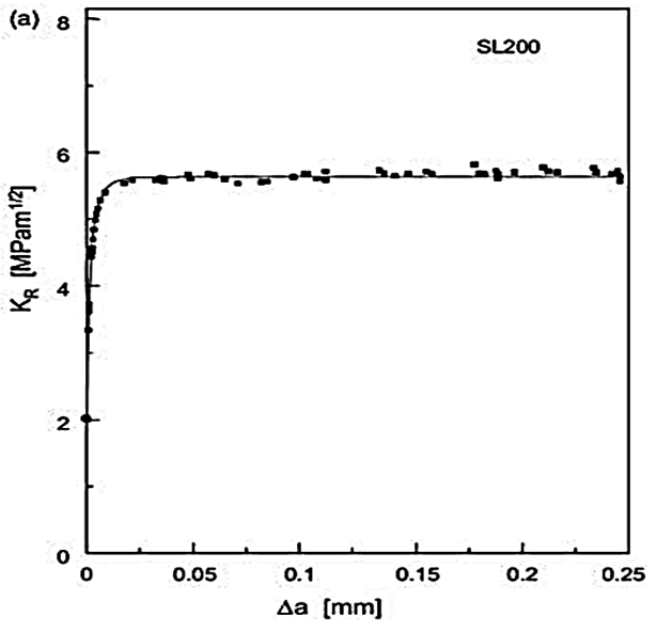


Bild 14: R-Kurve für Siliziumnitrid SL200 [Fue10]

Der Einfluss des R-Kurven-Effekts auf die statische Lebensdauer von Keramik wird schon in [FET90] erstmalig diskutiert. Ein direkter Rückschluss auf die dynamische Beanspruchbarkeit von keramischen Bauteilen ist hiermit jedoch noch nicht gegeben.

Bei Metallen werden anders als bei keramischen Werkstoffen die R-Kurven üblicherweise dynamisch gemessen und die Spannungsintensitätsamplitude ermittelt ($\Delta K_{I,th}$), während bei Keramiken quasistatisches Risswachstum untersucht wird durch schrittweise Erhöhung der Last ($K_{I,th}$ -Kurve). Die Messung solcher Kurven ist sehr aufwendig, da sehr kleine Wege und sehr steife Prüfeinrichtungen gefordert sind. Näheres zur neu entwickelten Prüftechnik findet sich in [JEL07] und [JEL11]. Das R-Kurven-Konzept bei Metallen und ein Bezug zur dort etablierten Dauerfestigkeit wird in [SAN08, S. 97ff] näher erläutert.

Die R-Kurven keramischer Werkstoffe erlauben eine qualitative Aussage über das Risswachstumsverhalten, was vor allem für neu entwickelte Werkstoffe interessant ist. Gewünscht wird ein risswachstumsverzögerndes Verhalten, das mit höheren Inertfestigkeiten einhergeht. Wie in [RIT03] beschrieben, kann jedoch die so erzielte Erhöhung der statischen Festigkeit zu größeren Ermüdungseffekten unter zyklischer Beanspruchung durch intrinsische Mechanismen führen.

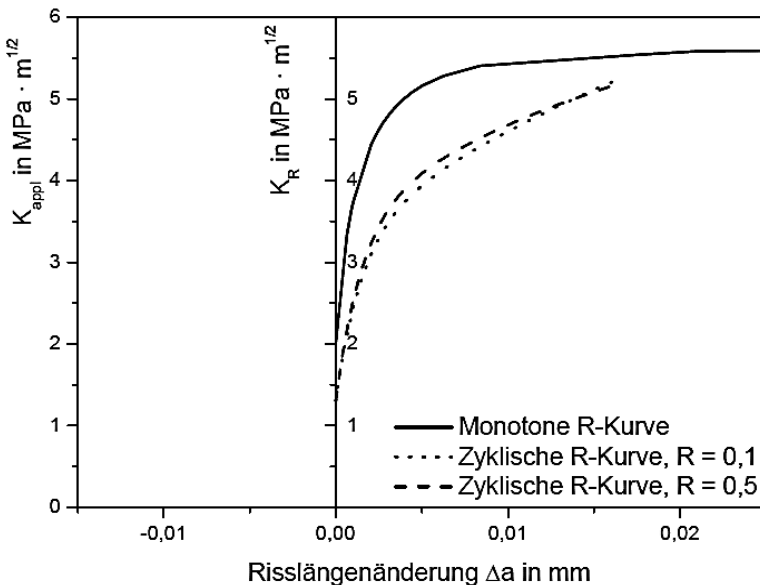


Bild 15: Vergleich von monotoner R-Kurve und den Näherungsfunktionen der zyklischen R-Kurven für $R = 0,1$ und $R = 0,5$ [SCHW10]

Der abschließende Vergleich zwischen Metallen und Keramiken zeigt bei der gemeinsamen Grundlage der Bruchmechanik wesentliche Unterschiede in der praktischen Handhabung.

Durch die unterschiedlich gewichteten Rissfortschrittsmechanismen liegen bei Keramik wesentlich kleinere Risslängen und höhere Risswachstumsexponenten vor als bei Metallen. In *Tabelle 2* sind jeweils Risswachstumskoeffizienten n sowie $K_{I,c}$ -Werte und typische Risslängen für unterschiedliche Werkstoffe aufgetragen. Es wird ersichtlich, dass hier ein Unterschied von ein bis zwei Größenordnungen besteht.

Tabelle 2: Gegenüberstellung mechanischer Werkstoffkenngrößen

| Werkstoff | Spannungsintensitätsfaktor $K_{I,c}$ in MPa [Rös07] | Druckfestigkeit (Keramik) σ_D bzw. Dehngrenze $R_{p,0,2}$ (Metalle) in MPa [Rös07] | Kritische Risslänge a_c in mm [Rös07] | Risswachstumsexponent n [FET00],[SAL07] |
|--|--|---|--|--|
| 40CrMo4 | 60 | 480 | 5 | 3,1 |
| 40NiCrMo6 | 60 | 1550 | 0,5 | 3,1 |
| 30CrMoV21-14 | 124 | 1080 | 4,2 | |
| Chrom-Nickel-Stahl | 50 90 | 1640 1420 | 0,3 1,3 | 3,1-3,9 |
| TiAl6V4 | 55 100 | 900 860 | 1,2 4,3 | |
| AlCu-Legierung | 25 35 | 455 325 | 1,0 3,7 | 2,05 2,7 |
| Al₂O₃ | 4,0..8,0 | 3000 | 0,00057 | 31,3-34,3 [FET00] 33 grobkörnig 113 feinkörnig [SAL07] |
| Si₃N₄ – direktgesintert (SSN) | 5 | 1200 | 0,0055 | 31-56 |
| ZrO₂ | 10 | 2000 | 0,008 | 40,7-42,3 |
| Porzellan | 1 | 350 | 0,0026 | 51-73 [FET00] 37 [SAL07] |

Bei metallischen Werkstoffen können für bruchmechanische Untersuchungen künstliche Risse in Größenordnung der kritischen Risslänge a_c erzeugt werden. Die bruchmechanischen Untersuchungen mit künstlichen Anrissen bei Keramik weisen jedoch immer Risslängen

gen aus, die wesentlich größer sind, als die natürlichen Risse im Material. [Rit94] unterscheidet in seinen Untersuchungen zwischen langen, kurzen und kleinen Rissen, die zu sehr unterschiedlichen Threshold-Werten $K_{I,th}$ führen.

2.2.4 Ermüdungsfestigkeitsnachweis

Unter Ermüdung („fatigue“) versteht man das Versagen unter einem langsam voranschreitenden Schädigungsprozess. Dieser kann chemisch, mechanisch oder thermisch bedingt sein. Während bei metallischen Bauteilen vor allem die mechanische Ermüdung unter schwingenden Betriebslasten im Vordergrund der Auslegung steht, wird bei keramischen Bauteilen statisch induziertes Risswachstum unter bestimmten Umgebungsbedingungen (chemisch-thermische Prozesse an der Risspitze) als Ermüdungsursache gesehen. Tatsächlich wird unter zeitlicher (durch Korrosion/Oxidation beschleunigter) und zyklischer (durch mechanische Vorgänge induzierte) Ermüdung unterschieden. In *Bild 16* wird exemplarisch der Unterschied beim Rissfortschritt gezeigt. Der Riss wächst unter anliegender statischer Beanspruchung wesentlich langsamer als bei zyklischer Beanspruchung.

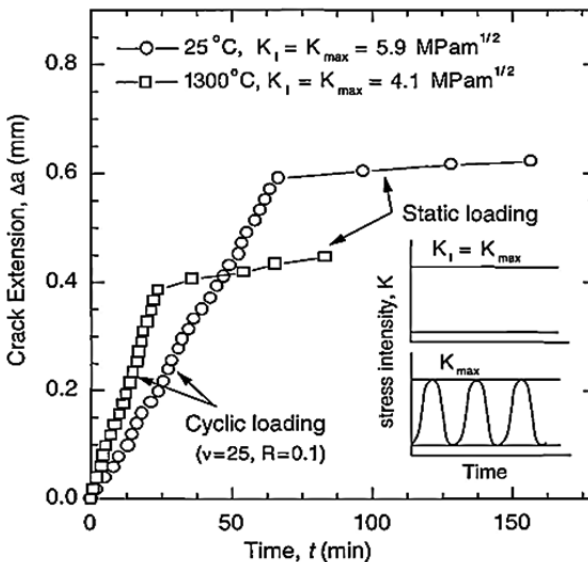


Bild 16: Zeitabhängige Risserweiterung unter statischer und zyklischer Last [Rit03]

Eine Überlagerung dieser beiden Vorgänge ist die thermisch induzierte Ermüdung, bei der zum einen Thermospannungen mechanische Versagensvorgänge bewirken zum anderen durch erhöhte Temperatur thermochemische Prozesse beschleunigt werden. Als Anwendungsfokus stehen hier die mechanisch beanspruchten Maschinenbauteile.

2.2.4.1 Ermüdungsfestigkeitsnachweis für Metalle

Die statische Beanspruchbarkeit von Metallen liegt wesentlich höher als die Dauerfestigkeit unter wechselnder oder schwellender Last. Um Bauteile dauerfest auslegen zu können, werden daher neben statischen Zugversuchen anhand genormter Schwingversuche (Zug-Druck- oder auch Biegeumlauf-Versuche) Werkstoffwechselfestigkeitskennwerte ermittelt. Angegeben werden die Spannungswerte, bei denen die Probekörper $N = 5 \cdot 10^6$ (Normalspannung) bzw. $N = 10^8$ (Schubspannungen) Lastwechsel ertragen haben. Als Grundannahme in der Ermüdung wird hier von einem zyklusabhängigen unterkritischen Risswachstum ausgegangen.

Man unterscheidet in einen Zeitfestigkeitsbereich, in dem dieses Risswachstum auftritt und nach einer endlichen Zyklenzahl versagt, und einem Dauerfestigkeitsbereich, in dem die Spannungen unterhalb eines kritischen Spannungswertes liegt, und damit kein Risswachstum auftritt. Zur empirischen Ermittlung der ertragbaren Spannungen werden in der Materialprüfung sogenannte Wöhlerkennlinien erstellt, in der zyklusabhängig die ertragbaren Spannungen aufgetragen werden [SAN08]. Eine solche Wöhlerkurve ist in *Bild 17* gezeigt.

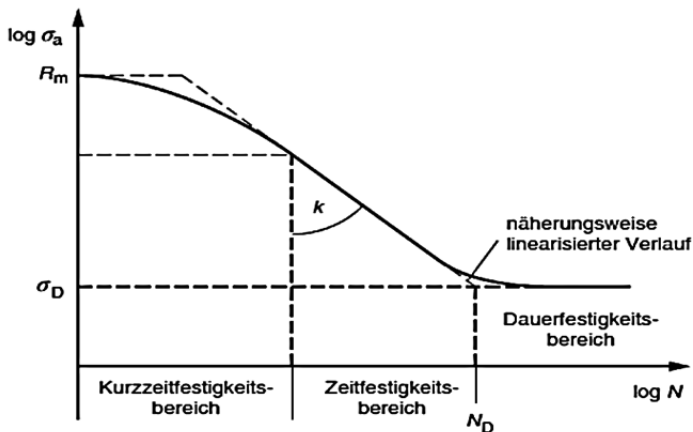


Bild 17: Schematischer Verlauf einer Wöhlerkennlinie [SAN08]

Es wird davon ausgegangen, dass unterhalb einer bestimmten Spannung die Beanspruchung im Bauteil so klein ist, dass keine Ermüdung mehr auftritt. Es wurde jedoch festgestellt, dass der Festigkeitsabfall nur langsamer voran geht, so dass eine weitere, sogenannte modifizierte Palmgren-Miner-Gerade eingeführt wurde, mit einer flacheren Steigung $(2k-1) < k$ für $N > N_D$ (siehe Bild 18 [SAN08]).

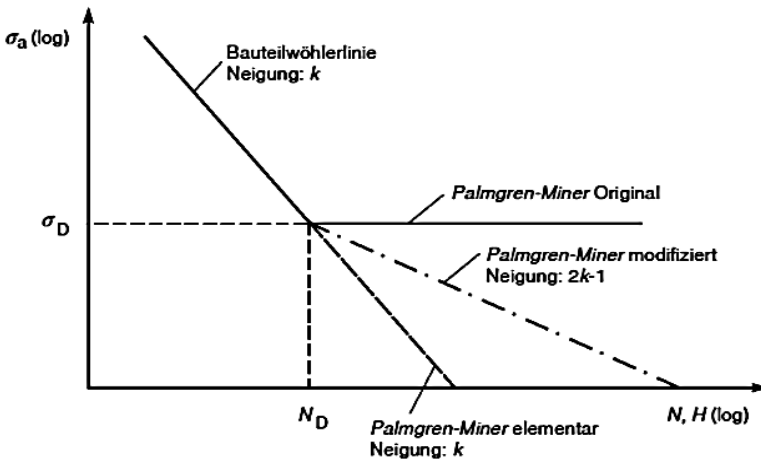


Bild 18: Modifizierte Palmgren-Miner-Gerade [SAN08]

In der Literatur findet man hier noch detailliertere Unterscheidungskriterien, die jedoch in der Grundaussage übereinstimmen, dass man die Bereiche in einen Zeitfestigkeitsbereich mit hohem Schädigungsfortschritt ($\sigma > \sigma_D$, $N < N_D$) und einem Dauerfestigkeitsbereich mit niedrigem oder keinem Schädigungsfortschritt ($\sigma < \sigma_D$, $N > N_D$) einteilt [SAN08].

Die neuere Forschung beschäftigt sich inzwischen mit dem High-Cycle- und dem Very-High-Cycle-Fatigue, da die Langzeiteffekte ($N > 10^8$) bisher noch nicht hinreichend untersucht wurden [MÜL10], SPP1466. Diese Sichtweise hat jedoch bisher noch keinen Einfluss in die Auslegungsstandards gefunden, so dass man klassischerweise von einer dauerfesten Auslegung spricht, wenn man im Bereich oberhalb der Grenzyklenzahl N_D auslegt.

Wesentlicher Bestandteil der Auslegung ist es, den experimentell ermittelten Wechselfestigkeitskennwert σ_w in eine vergleichbare Betriebs-Bauteilfestigkeit σ_{BK} umzurechnen (siehe Bild 19). Bei der zyklischen Beanspruchung geht neben der Einbeziehung der vorherrschenden Mittelspannung (Mittelspannungsempfindlichkeit) und der Bauteilgröße (Größeneinfluss) auch die Oberflächenbeschaffenheit des Bauteils mit ein, da eine raue Oberfläche bevorzugter Auslöser von Risswachstum ist. Diese errechnete Bauteil-

Betriebsfestigkeit muss bei dauerfester Auslegung größer sein als die größte auftretende Spannungsamplitude.

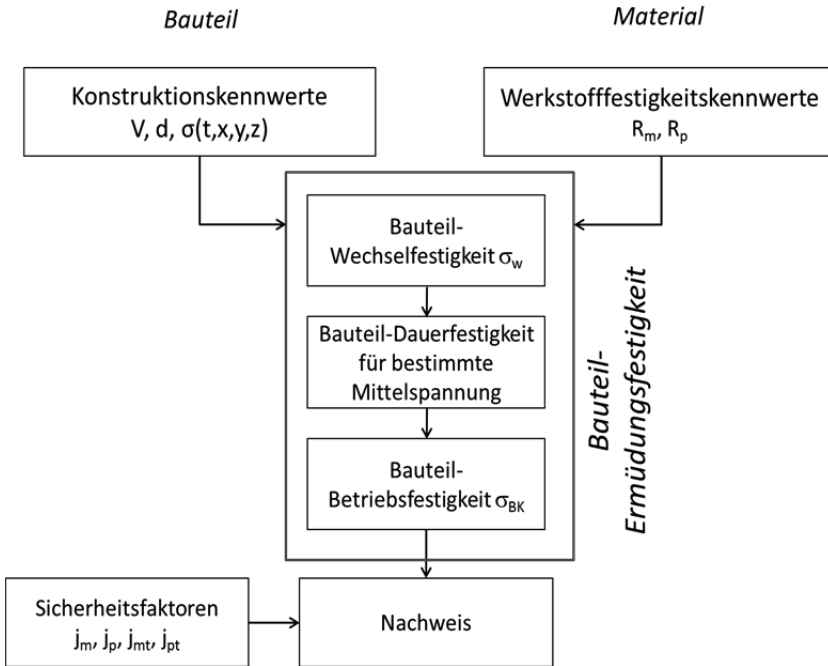


Bild 19: Schematischer Ablauf zur Durchführung des Ermüdungsfestigkeitsnachweises

Es wird bei der Bestimmung des zulässigen Materialwertes nach verschiedenen Belastungsarten unterschieden (z. B. schwelend $R = 0$ und wechselnd $R = -1$) mit R als Quotient der Unterspannung / Oberspannung. Hier verhalten sich die Materialien unterschiedlich, was in der sogenannten Mittelspannungsempfindlichkeit M des Werkstoffes zusammengefasst wird. Für $M = 0$ ist nur die Spannungsamplitude – und damit übertragen auf den Riss die Spannungsintensitätsamplitude ΔK_I – ausschlaggebende Lastgröße (kein Mittelspannungseinfluss). Im Falle $M = 1$ ist nur die maximale Spannung (Summe aus Mittelspannung und Amplitude) begrenzende Spannung – auf den Riss übertragen ist damit nur $K_{I,c}$ riss-treibende Größe. Im folgenden Bild ist der Mittelspannungseinfluss für verschiedene Werkstoffe aufgetragen. Hier wird sichtbar, dass, je spröder der Werkstoff, desto höher ist der Mittelspannungseinfluss. Auf Formel {36} übertragen, bedeutet dies einen hohen Mittelspannungseinfluss für $q < p$ und einen niedrigen Mittelspannungseinfluss für $q > p$. Die

Mittelspannungsempfindlichkeit für unterschiedliche Werkstoffe ist in *Bild 20* verdeutlicht. Die keramischen Werkstoffe weisen als spröde Werkstoffe einen sehr hohen Mittelspannungseinfluss auf.

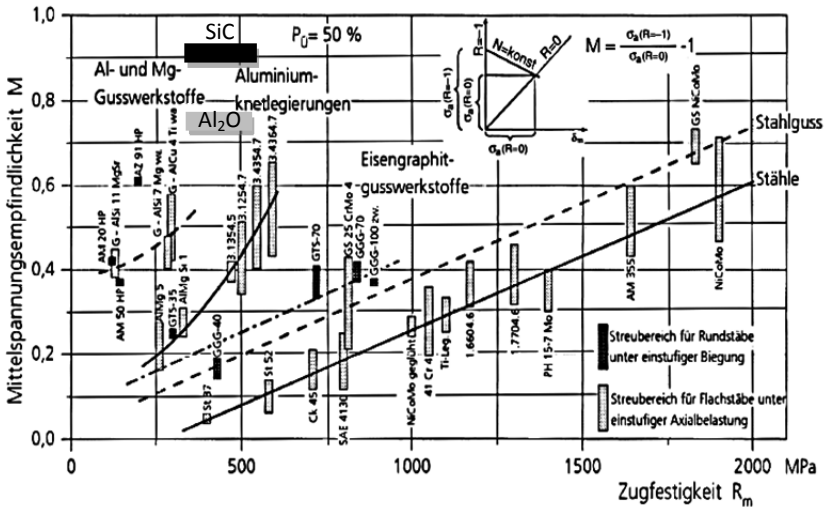


Bild 20: Mittelspannungsempfindlichkeit verschiedener Stähle nach Sonsino [HA106] und Ergebnisse aus [Usb11] für Keramiken

2.2.4.2 Ermüdungsfestigkeitsnachweis für keramische Bauteile

Für keramische Bauteile existiert kein Nachweis zur Ermüdung. In der englischsprachigen Literatur findet man die Bezeichnung ‚static fatigue‘, im Deutschen findet man eher die Bezeichnung Lebensdauerberechnung. In diesem Abschnitt wird daher eine Zusammenstellung von neueren Veröffentlichungen zum Thema Ermüdung, Lebensdauer und Rissvorgänge bei zyklischer Belastung erfolgen. Nach vorheriger Beschreibung der Bruchmechanik sind zwei unterschiedliche Vorgehensweisen für eine zeit- bzw. dauerfeste Auslegung von keramischen Bauteilen bekannt.

- Analytische Lebensdauerberechnung unter Einbeziehung der Risswachstumsparameter
- Empirische Ermittlung der Wöhlerkennlinie und dauerfeste Auslegung analog zu metallischen Bauteilen

Analytische Lebensdauerberechnung unter Einbeziehung der Risswachstumsparameter

Es wird ein unterkritisches Risswachstum gemäß Formel {33} angenommen [GRA88], [MUN01], [SAL07]. Dabei wird davon ausgegangen, dass das Risswachstum unter zyklischer Belastung auf dem gleichen Effekt beruht wie das Risswachstum unter statischer Last. Die Werte können in einem dynamischen Biegeversuch gem. DIN EN 843-3 ermittelt werden, bei dem unterschiedliche Spannungsrampen im Dreipunkt- bzw. Vierpunkt-Biegeversuch zu unterschiedlichen Bruchfestigkeiten führen. Man erhält die zwei bruchmechanische Parameter B und n .

Der logarithmische Zusammenhang beim Risswachstum nach {33} wird auf den kritischen Spannungsintensitätsfaktor $K_{I,c}$ bezogen

$$v = \frac{da}{dt} = A \cdot K_I^n = A^* \cdot \left(\frac{K_I}{K_{I,c}} \right)^n \quad \{36\}$$

Unter Verwendung der bruchmechanischen Parameter B und n erhält man dann folgenden Zusammenhang für eine beliebige Spannungshistorie

$$\int_0^{t_f} \sigma(t)^n dt = B \cdot \sigma_c^{n-2} \left[1 - \left(\frac{\sigma_f}{\sigma_c} \right)^{n-2} \right] \quad \{37\}.$$

Vereinfacht gilt für Spannungen σ_f unterhalb der kritischen Bruchspannung $\sigma_c \left(\frac{\sigma_f}{\sigma_c} \right) \ll 1$, sowie für größere Risswachstumsexponenten $n \gg 3$, wie sie bei Keramik vorliegen

$$\int_0^{t_f} \sigma(t)^n dt = B \sigma_c^{n-2} \quad \{38\},$$

so dass sich eine Zeit t_f bis zum Versagen bei konstanter Spannung $\sigma_f < \sigma_c$ zu

$$t_f = B \sigma_c^{n-2} \sigma_f^{-n} \quad \{39\}$$

ergibt.

Unter Annahme der gleichen Versagensmechanismen kann die Lebensdauer unter zyklischer Belastung t_{fc} nach [Mun01] auf Basis der Lebensdauer unter statischer Belastung vorhergesagt werden. Dazu muss die zyklische Belastung durch eine Gewichtsfunktion berücksichtigt werden. Es gilt dann

$$t_{fc} = t_f \left(\frac{\sigma}{\sigma_a} \right)^n B \frac{1}{h(n, \frac{\sigma_m}{\sigma_a})} \quad \{40\}.$$

Mit σ : Spannung unter statischer Last, σ_a : Spannungsamplitude und σ_m : Mittelspannung.

Für sinusförmige Beanspruchungen ohne Mittelspannung ($\sigma_m = 0$), wie sie bei vielen Bauteilen vorliegen, gilt für die Gewichtsfunktion

$$h(n, 0) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \frac{\Gamma\left(\frac{n}{2} + \frac{1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n}{2} + 1\right)} \quad \{41\}.$$

Alternativ kann die vereinfachende Paris-Gleichung durch eine Rissfortschrittskurve substituiert werden. Es wird dann folgende Gleichung zur Beschreibung des Versagenszeitpunktes zu Grunde gelegt

$$t_{f,I} = \frac{2}{\sigma_I^2 Y^2} \int_{K_i}^{K_{I,c}} \frac{K_I}{v(K_I)} dK_I \quad \{42\}.$$

Die Annahmen, dass die gleichen Versagensmechanismen für statisches und zyklisches Risswachstum gelten, sind jedoch nicht auf jede Keramik übertragbar. In [MUN01] wird ein rechnerischer Ansatz zum Nachweis eines zyklischen Effektes auf Basis der o. a. Gleichungen vorgestellt, deren Grundlagen in [GRA88] zu finden sind. Hier sind die Unterschiede zwischen statischem und zyklischem Rissfortschritt erstmals untersucht worden. In [JIA93] findet man Übereinstimmung zwischen Rechnung und experimentellen Daten für unterschiedliche Y_2O_3 - ZrO_2 -Keramiken. Bei einer Werkstoffzusammensetzung werden jedoch abweichende Ergebnisse festgestellt, die auf spannungsinduzierte Phasenumwandlungsprozessen an der Riss Spitze beruhen. Genauere Untersuchungen liefern [FET98] sowie [DAU98], bei denen jeweils versucht wird, zwischen zyklischem und statischem Ermüdungseffekt zu unterscheiden. Auch in [GUI91] wird ein zyklischer Effekt bei der Ermüdung von Aluminium- sowie Zirkoniumoxid experimentell bestätigt. In neueren Untersuchungen von Nejma [NEJ07] werden klassische Wöhlerlinien an Aluminiumoxid mit unterschiedlichen Spannungsverhältnissen auf zwei unterschiedlichen Temperaturniveaus untersucht. Es zeigt sich ein sehr abweichendes Verhalten zwischen Raumtemperatur und $T = 900^\circ \text{C}$ Betriebstemperatur. Bei hohen Temperaturen wird ein metallähnlicheres Verhalten festgestellt, die Wöhlerkennlinien fallen flacher aus und die Festigkeit ist insgesamt leicht erhöht.

Eine neuere Zusammenfassung der nationalen Bestrebungen, die Lebensdauervorhersage für keramische Werkstoffe zu beschreiben, ist in [FET08] zu finden. Das schon genannte Programm STAU hat diese Lebensdauerabschätzung in einem Postprozessor implementiert, wobei die erweiterte Form aus Kombination von überlagerter Spannungsintensität

$K_{I,c}^q$ und der Spannungsintensitätsamplitude $(\Delta K_I)^p$ gem. {34} verwendet wird. Es zeigen sich hier teilweise noch starke Abweichungen zu den empirisch ermittelten Werten [HÄR09]. Es wird eine von der Zyklenzahl abhängige Weibullverteilung eingeführt mit

$$P_A(N_f) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{N_f}{N_0^*}\right)^{m^*}\right) \quad \{43\}$$

mit

$$n = \frac{m}{m^*} + 2 \quad \{44\}$$

und

$$N_0 = \frac{B\sigma_0^{n-2}}{(\Delta\sigma)^n} \quad \{45\}.$$

Alle diese Betrachtungen gehen von der Annahme einer weibullverteilten Grundgesamtheit der Werkstoffeigenschaft (siehe Gleichung {4}), sowie einem logarithmischen Zusammenhang des Risswachstums (nach Gleichung {32}) aus und sind somit nur für den Zeitfestigkeitsbereich gültig, in dem die Paris-Gleichung gilt.

Empirische Ermittlung der Wöhlerkennlinie und dauerfeste Auslegung analog zu metallischen Bauteilen

Alternativ zur Lebensdauerberechnung existieren aus der Betriebsfestigkeit einige wenige Untersuchungen zum Wöhlerlinienverlauf. Die meisten stammen aus den 1990er Jahren. Am Institut für Angewandte Materialien - Keramik im Maschinenbau in Karlsruhe (IKM) wurde das statische und zyklische Ermüdungsverhalten von umwandlungsverstärktem ZrO_2 in [MAT96], sowie die Ermüdung bei Raumtemperatur von Siliziumnitrid [WED92] untersucht. Des Weiteren wurden in den neunziger Jahren am Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit in Darmstadt Untersuchungen zu Siliziumnitrid sowie Aluminiumoxid durchgeführt [BUX94], [SON92], [SON93]. Neuere zyklische Untersuchungen an Torsionsproben sowie Biegeproben wurden im Rahmen des SFB 483 in Karlsruhe vorgenommen (z. B. [HÄR10], [SCHW10], [HÄR11]).

Si_3N_4 Die Durchläufer in [WED92], die nach Beanspruchung zerstörend geprüft wurden, wiesen den gleichen Festigkeitsbereich auf wie die Inertfestigkeit. Dieses weist darauf hin, dass während der Prüfung keine schädigende Wirkung eintrat, so dass die Proben unterhalb einer kritischen Spannung als dauerfest zu bezeichnen sind. Die zyklischen Beanspruchungshorizonte liegen innerhalb des Streubandes der Inertfestigkeit. Übereinstimmend hiermit sind die Untersuchungen von Sonsino und Mitarbeitern, in denen auch der Mittelspannungseinfluss untersucht wurde [SON92], [BUX94]. Ergebnis ist eine hohe Mittelspannungsempfindlichkeit, so dass als Ergebnis für die Auslegung die maximal auftre-

tende Spannung $\sigma_{max} = \sigma_a + \sigma_m$ die auslegungsrelevante Größe ist (siehe Gleichung {26}). Neue Untersuchungen unter schwellender Beanspruchung findet man in [HÄR11].

Al₂O₃ Aluminiumoxid wurde in [Bux94] von Buxbaum und Sonsino hinsichtlich des zyklischen Ermüdungsverhaltens untersucht. Es wurde eine identische flache Steigung ($k=85$) ermittelt, so dass auch hier davon ausgegangen wird, dass nur geringes zyklisches Ermüden vorhanden ist. In *Bild 21* ist eine normierte Wöhlerkennlinie für zyklisch getestete Al₂O₃ und Si₃N₄-Proben aus [SON92] gezeigt.

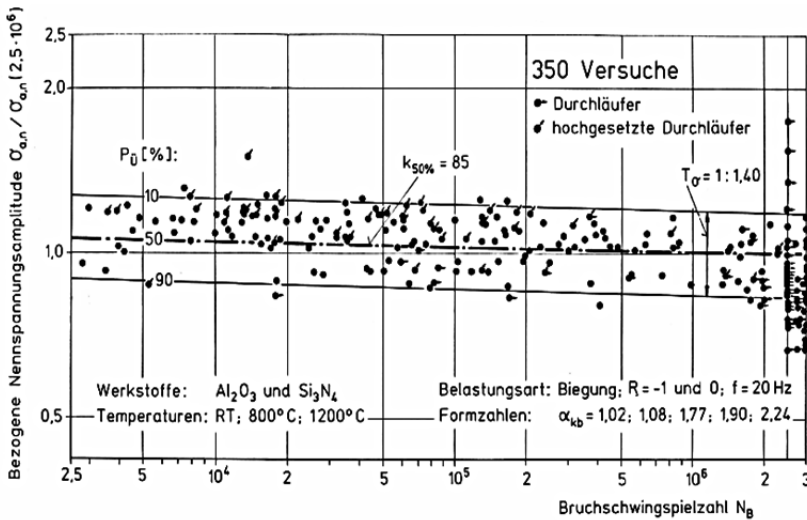


Bild 21: Normierte Wöhlerkennlinie für Al₂O₃ und Si₃N₄, $k=85$ [SON92]

Neuere Untersuchungen von Aluminiumoxid unter zyklischer Beanspruchung sind in [NEI05] zu finden. Es werden Zug-Druck-Proben (Rundproben), sowie 4-Pkt.-Biegeproben unter zwei verschiedenen Temperaturen untersucht. Die Mittelspannungsempfindlichkeit ist bei Umgebungstemperatur sehr hoch (hoher Einfluss der Maximalspannung), bei hohen Temperaturen nimmt der Einfluss sehr weit ab, so dass hier der Einfluss der Spannungsspannweite überwiegt und das Materialverhalten dem vom Stahl ähnelt. Die Ursache wird hier in Stress relaxation processes gesehen. Weitere zyklische Versuche findet man in [SCHW109], sowie [JAN10].

ZrO₂ Alle untersuchten Varianten des umwandlungsverstärkten ZrO₂, die von [MAT96] untersucht wurden, weisen überlagert vom statischen Risswachstum starke zyklische Ermüdungsanfälligkeit auf, wobei die wechselnde Beanspruchung eine höhere Anfälligkeit

auf die Festigkeit aufweist als die schwellende Beanspruchung. In [MAT96] wurden jedoch keine Wöhlerkurven erstellt. Die in *Tabelle 2* aufgeführten Werte zeigen jedoch, dass die Durchläufer auf einem wesentlich niedrigeren Niveau liegen, als die statischen Festigkeitswerte. Kernaussage ist, dass statische und zyklische Belastung kein gleiches Betriebsverhalten aufweisen, was mit [GUI01] übereinstimmt. [RIT03] unterscheidet bei den Bruchvorgängen daher gezielt zwischen extrinsischen und intrinsischen Rissmechanismen, um das Verhalten unter zyklischer Last bei spröden Werkstoffen genauer zu erläutern.

2.3 Konstruktive Auslegung von zyklisch beanspruchten Keramikbauteilen

2.3.1 Wöhlerkurven versus Lebensdauerberechnung

In den neusten Veröffentlichungen aus dem konstruktionsmechanischen Bereich (z. B. in [MAY06], [BLA09]) wird immer noch auf Wöhlerkennlinie von Sonsino und Buxbaum aus den Jahren 1992-1994 verwiesen, da wenig neue Untersuchungen an Bauteilproben durchgeführt wurden. Im Maschinenbau findet man keine weiteren Auslegungsvorschriften für einen Ermüdungsfestigkeitsnachweis von Bauteilen.

In der Werkstoffentwicklung wird dagegen intensiv über den Rissfortschritt und die Rissverzögerungseffekte in neuen Keramiken geforscht. In [FET90] wurde der Rissverzögerungseffekt für statisches Risswachstum mechanisch untersucht und in [FET91] werden zyklische empirische Lebensdauerversuche mit statisch nach Gleichung {39} berechneten Lebensdauern verglichen. Die empirisch ermittelten Lebensdauern unter zyklischer Last fallen hier deutlich niedriger aus als die aus dynamischen Tests extrapolierten. In [RIT05] wird das unterschiedliche R-Kurven-Verhalten unter statischer und zyklischer Last diskutiert. Dabei werden die charakteristischen Risslängen und die Brückeneffekte des Materials einbezogen.

Diese neueren materialwissenschaftlichen Untersuchungen der Rissverzögerung bzw. dem Abbau rissverzögernder Effekte durch zyklische Belastung haben jedoch bisher noch keinen Eingang in eine verbesserte Auslegungsroutine für keramische Bauteile gefunden. Der Stand der Technik des Forschungszentrums Karlsruhe ist in [FET08] zusammengefasst und basiert auf der Lebensdauerberechnung unter Annahme eines unterkritischen Risswachstums nach Gleichung {37} ff. Ein Abgleich dieses analytischen Vorgehens mit empirischen Versuchen unter zyklischer Last wird in [HÄR09] vorgenommen, wobei in einigen Fällen noch große Diskrepanzen zwischen Versuch und Berechnung existieren. In [HÄR11] wird die Abhängigkeit des Risswachstumsexponenten von der Art der zyklischen Beanspruchung unterstrichen, die jedoch noch nicht hinreichend genau für verschiedene Materialien untersucht wurde.

In der Literatur zur Auslegung von zyklisch beanspruchten Maschinenbauteilen wird sehr unterschiedlich vorgegangen.

- [MAY06] fasst die Ventilentwicklung aus Keramik zusammen, zieht die aus den 90er Jahren stammenden Wöhlerkennlinien von [SON92] hinzu und schlägt vor, „dauerfest“ unterhalb einer Dauerschwingfestigkeit auszulegen.
- Bartelt rechnet in [BAR06] mit Hilfe des unterkritischen Risswachstums eine Lebensdauer t_f aus. Er bestimmt in dynamischen Versuchen die Risswachstumsparemeter selbst, geht jedoch anschließend „... von einer konstanten Last...“ aus und berücksichtigt dabei keinen zyklischen Zeitverlauf.
- [BLA09] rechnet rein statisch unter Einbeziehung des effektiven Volumens (PIA), einer Ausfallwahrscheinlichkeit von $P = 10^{-4}$ und einem vorgegebenen Weibullmodul. Dann legt er den Thresholdwert der Spannungsintensität, bei der kein unterkritisches Risswachstum auftritt, auf $K_{I,th} = \frac{1}{4}K_{I,c}$ fest und folgert daraus, dass die Dauerfestigkeit ein Viertel der Bruchfestigkeit beträgt.

2.4 Abgeleiteter Forschungsbedarf

Die Kenntnisse aus der Bruchmechanik haben sich in der Werkstofftechnik etabliert. Sie bildet die Grundlage für die Auslegung von Bauteilen sowohl aus metallischen als auch keramischen Werkstoffen. Es lassen sich übereinstimmende Definitionen von Versagensmechanismen für metallische und keramische Strukturbauteile finden. Bei den metallischen Werkstoffen liegen zudem umfangreiche empirische Daten aus Festigkeitsuntersuchungen an Probekörpern vor, auf deren Grundlage werkstoffspezifische Auslegungsvorschrift entwickelt wurden (z. B. [FKM03]). Bei den keramischen Werkstoffen fehlen hingegen vor allem empirische Werkstoffdaten, mit denen die theoretischen Grundlagen der Auslegung verifiziert werden können.

2.4.1 Statische Festigkeitsauslegung von keramischen Bauteilen

Die statische Festigkeitsauslegung keramischer Bauteile ist unter Anwendung der bestehenden Bruchmechanik möglich. Die Handhabbarkeit der Auslegungsroutine ist dagegen nicht mit den üblichen Standardroutinen aus dem Maschinenbau vergleichbar. Es bestehen unterschiedliche Annahmen bei den Versagenshypthesen, so dass der Konstrukteur ein Expertenwissen zur Berechnung seiner konstruktiven Entwürfe benötigt. Um keramische Bauteile in Produkten des Maschinenbaus besser integrieren zu können, ist ein vereinfachtes methodisches Vorgehen für die Auslegung zu entwickeln und mit empirischen Werkstoffdaten zu verifizieren.

2.4.2 Ermüdungsfestigkeit

Die Ermüdungsfestigkeit von keramischen Werkstoffen ist bisher nur unzureichend untersucht. Das Vorgehen bei der Ermittlung einer Bauteillebensdauer bei metallischen und keramischen Bauteilen unterscheidet sich grundsätzlich. Das Vorgehen bei der Lebensdauerberechnung von keramischen Bauteilen basiert auf vereinfachten bruchmechanischen Annahmen und wird analytisch und hilfsweise numerisch berechnet. Die hierfür benötigten empirischen Werkstoffdaten sind sehr schwer zu ermitteln und die Ergebnisse unterliegen einer großen Messunsicherheit. Die Lebensdauerberechnung befindet sich noch im Forschungsstadium [HÄR11], so dass sich in der Konstruktionspraxis aufgrund der Komplexität und der fehlenden empirischen Überprüfung bisher keine Lebensdauerberechnung durchgesetzt hat. Die spröden Keramikwerkstoffe haben in der mechanischen Anwendung auch keine wesentlichen Ermüdungseffekte zu verzeichnen. Bei einer Werkstoffentwicklung in Richtung duktilerer Keramikwerkstoffe ist dagegen verstärkt mit Ermüdungseffekten bei zyklischen mechanischen Beanspruchungen zu rechnen. Es besteht damit Forschungsbedarf in der empirischen Untersuchung von dynamischen und zyklischen Effekten bei unterschiedlichen keramischen Werkstoffen.

Die Vorgehensweise bei der LebensdauerAuslegung von metallischen Werkstoffen ist historisch begründet empirischer Art. Es werden Wöhlerkennlinien unter verschiedenen Umgebungsparametern (Temperatur, Feuchtigkeit, etc.) ermittelt. Die neuere Bruchmechanik versucht jedoch, analytische Vorgehensweise zu entwickeln, um Lebensdauern a priori vorhersagen zu können.

Die beiden Vorgehensweisen bei metallischen und keramischen Werkstoffen haben bisher keinerlei gemeinsame Grundlage. Die Theorie der Bruchmechanik bietet jedoch eine Gemeinsamkeit, die beide Vorgehensweisen miteinander verknüpfen kann. Bei keramischen Werkstoffen besteht vor allem Forschungsbedarf in der empirischen Werkstoffdatenermittlung und der Verifizierung der Lebensdauerberechnung.

2.4.3 Allgemeingültige Auslegungsvorschriften

Neben den werkstoffwissenschaftlichen und werkstofftechnischen Untersuchungen von neuen keramischen Werkstoffen ist es für die Anwendung im Maschinenbau notwendig, die keramischen Auslegungsmethoden in die etablierten Vorgehensweisen im Maschinenbau zu integrieren. Durch die wachsende Werkstoffvielfalt wird der Konstrukteur verstärkt auf methodische Auswahlverfahren in der Werkstoffauswahl zurückgreifen müssen. Solche methodischen Vorgehensweisen benötigen eine gemeinsame, allgemeingültige Werkstoff- und Auslegungsgrundlage. Eine solche Vorschrift zur Dimensionierung von keramischen Strukturbauteilen, die in vorhandene, allgemeingültige Auslegungsvorschriften integrierbar ist, wird in der vorliegenden Arbeit entwickelt.

3 Ermittlung von Werkstoffkennwerten unter mehraxialer Beanspruchung

Bisher werden die Materialkennwerte von handelsüblichen Strukturkeramiken, auf die der Konstrukteur zurückgreifen kann, nach vorgegebener Norm DIN EN 843-1 unter uniaxialer Beanspruchung im Drei- bzw. Vierpunktbiegeversuch von den Herstellern ermittelt. Über die Spannungsrate kann zusätzlich nach DIN EN 843-3 bei logarithmischem $K_{I,C}$ -Verlauf der Risswachstumsexponent n ermittelt werden. Dieser ist üblicherweise jedoch nicht in den Datenblättern angegeben, so dass für eine Vorauslegung nur die Bruchspannung σ_c und die Streuung in Form des Weibull-Moduls m vorliegen. Die amerikanischen Normen sehen alternativ zum Biegeversuch Rundproben vor, die in einem Zugversuch geprüft werden. Diese Zugversuche sind im deutschsprachigen Raum jedoch nicht üblich. Eine neue deutsche Norm (2009) sieht in Zukunft auch Prüfungen unter biaxialer Beanspruchung vor („Doppelring-Biegeversuch“, DIN 51105).

Allen Probekörpern gemein ist, dass sie im Verhältnis zu Bauteilen im Maschinenbau verhältnismäßig klein sind. Meistens sind polierte Oberflächen vorgesehen, um möglichst hohe Festigkeiten ausweisen zu können. Die Übertragbarkeit auf Bauteile mit mehraxialen Spannungsverläufen, sowie die Übertragbarkeit auf zyklische Schwingbeanspruchung ist schwierig.

Das vorliegende Kapitel umfasst die empirische Studie, die unter dem Titel „Lebensdauerabschätzung von keramischen Bauteilen in hydrostatischen Maschinen“ im Rahmen der DFG-Projektes FE 271/10-2 gefördert wurde [Usb09], [Usb10A], [Usb10B], [Usb11]. In einem vorangestellten Projektabschnitt wurde hierzu ein Prüfstand entwickelt und erste Konzepte für den Prüfumfang vorgeschlagen (FE 271/10-1) [Scheu05].

Die Idee des Prüfstands resultiert aus mehreren Arbeiten über keramische Bauteile, die am Institut vorab durchgeführt wurden [SCHÖP99], [BAR06]. Die Studie untersucht folgende Fragestellungen:

- Übertragbarkeit von mehraxialen Spannungszuständen in keramischen Strukturbauteilen
- Verifizierung von Versagenshypothesen unter hoher Schubbeanspruchung
- Dynamische und zyklische Beanspruchbarkeit von Strukturkeramik in üblicher Bauteilgröße
- Einfluss von zusätzlichen Druckspannungen auf dynamische und zyklische Belastungszustände
- Unterschiede zwischen statischem und zyklischem Risswachstum

3.1 Versuchsstand zur mehraxialen Beanspruchungsanalyse

Zur Untersuchung der Proben wurde ein Versuchsstand entwickelt, in dem betriebsähnliche, zyklische Belastungszustände erzeugt werden können. Typisch für rotierende Maschinen sind proportional zur Drehzahl auftretende zyklische Beanspruchungen, so dass neben der statischen Auslegung eine Betriebsfestigkeitsbetrachtung notwendig wird. Es wird daher im Rahmen dieser Arbeit eine bauteilähnliche keramische Strukturprobe experimentell und numerisch untersucht. Die Idee des Prüfstandkonzeptes ist die Prüfung identischer Probekörper in Bauteilgröße unter unterschiedlichen, mehraxialen Belastungen, sowohl statisch als auch zyklisch. Die Beanspruchung ist dabei angelehnt an die Beanspruchung des Axialkolbens einer Axialkolbenmaschine (Bild 22).

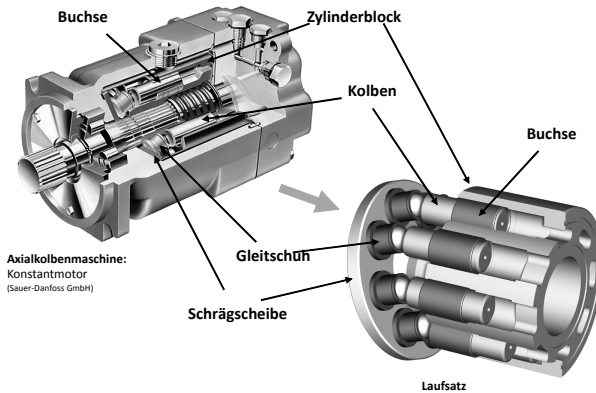


Bild 22: Axialkolbenmotor [BAR06]

Der Spannungszustand besteht aus einer Torsions- und einer Druckbeanspruchung, die unabhängig voneinander (nicht-proportional) auf den Kolben wirken. Ein solcher Spannungszustand wird in dem hier vorgestellten NPT-Prüfstand (**N**icht**p**roportionale **T**orsionsbeanspruchung) erzeugt.

3.1.1 Probekörperwahl

Die Probe besteht aus einem in der Mitte eingeschnürten Rundstab mit einem Durchmesser von $D = 15$ mm, einer Länge $L = 90$ mm und einem minimalen Durchmesser in der Einschnürung von $d = 6$ mm (*Bild 23*). Die Geometrie des Probekörpers ist so gewählt worden, dass bei rechnerischer Überlagerung der Torsionsspannungen mit den Druckspannungen im kleinsten Querschnitt der Probe die höchsten Spannungen entstehen [SCHEU05].

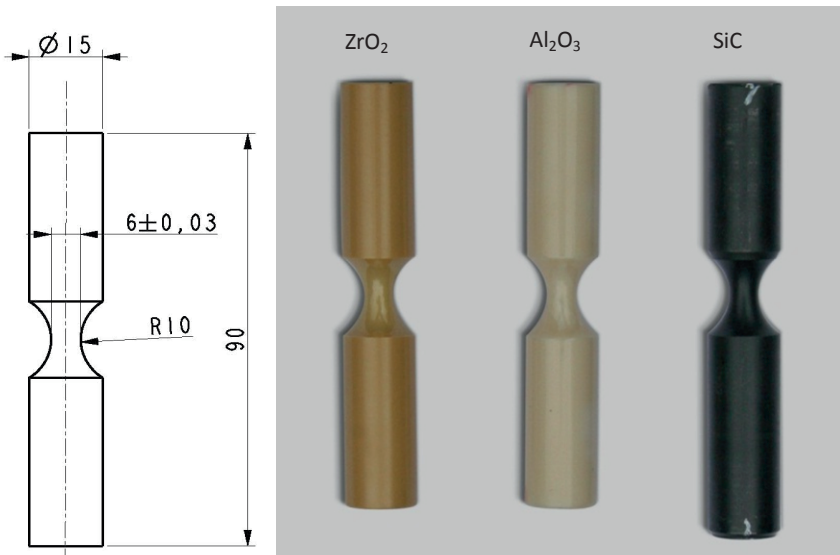


Bild 23: Abmessung der Probekörper, sowie Ausführung in ZrO_2 , SiC und Al_2O_3

Gleichzeitig wird mit der Wahl der Probekörpergeometrie ein möglichst ungleiches effektives Volumen V_{eff} bei den verschiedenen Belastungsarten angestrebt, um den Größeneinfluss empirisch zu überprüfen. Die zwei Beanspruchungen sind in *Bild 24* vereinfacht skizziert.

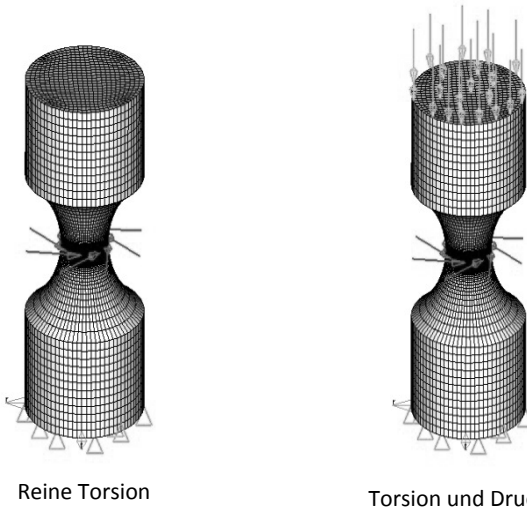


Bild 24: Belastungsmodell für zwei Beanspruchungsarten

Durch die zwei Belastungsfälle erhält man nach detaillierter Modellierung zwei unterschiedliche Hauptspannungsverläufe in der Probe (Bild 25), während die Schubspannungen in beiden Belastungsfällen nahezu identisch sind (Bild 26). Bei einer lateral eingeleiteten Normkraft von $F_{\text{quer}} = 1\text{ kN}$ berechnet sich die maximale Hauptnormalspannung zu $\sigma_1^*, \text{ ohne Druck} = 655\text{ MPa}$. Mit einer zusätzlich Normdruckkraft erhält man eine Referenzspannung von $\sigma_1^*, \text{ mit Druck} = 554\text{ MPa}$. Das Verhältnis der Referenzspannungen im Bauteil ergibt sich damit zu $\frac{\sigma_1^*, \text{ ohne Druck}}{\sigma_1^*, \text{ mit Druck}} = 1,18$.

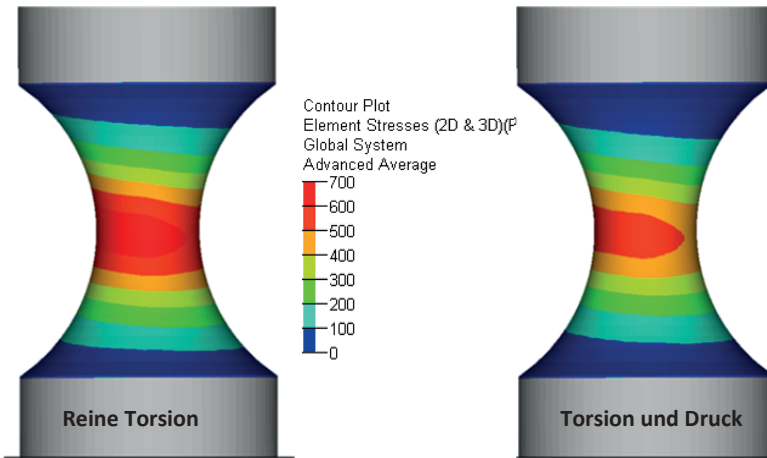


Bild 25: Hauptspannungsverlauf σ_1 innerhalb der Probe, reine Torsion (links) und Torsion mit Druck (rechts)

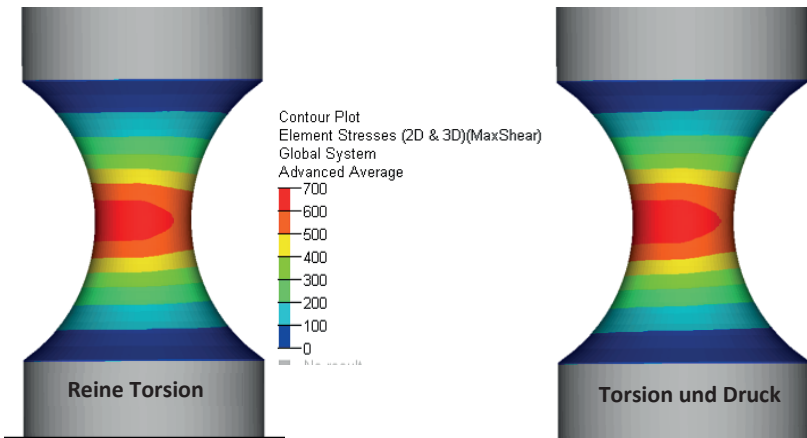


Bild 26: Schubspannungsverlauf τ_{max} innerhalb der Probe

Aufgrund des unterschiedlichen Spannungsverlaufs erhält man unterschiedliche effektive Volumina und unterschiedliche effektive Oberflächen [Usb09].

3.1.2 Umsetzung des Prüfstandkonzeptes

Der Prüfstand ist als hydraulischer Prüfstand konzipiert (*Bild 27*). Vorteil der hydraulischen Kraftaufbringung ist hierbei die spannungsfreie Einspannung der Probekörper, da die Hydraulikkolben jeweils nur einseitig wirken und keine zusätzlichen Zug(Fehl-)spannungen in die Probe einbringen können. Ein vertikal wirkender Kolben (1) bringt die Druckkraft über einen Hebelarm (2) axial in die Probe (3) ein. Zwei horizontale Kolben (4a, 4b) bringen über ein neu integriertes Regelventil wechselseitig angesteuert die Querkraft ein, die über einen lateralen Versatz eine Torsionsbeanspruchung in die Probe einleitet (*Bild 28*).

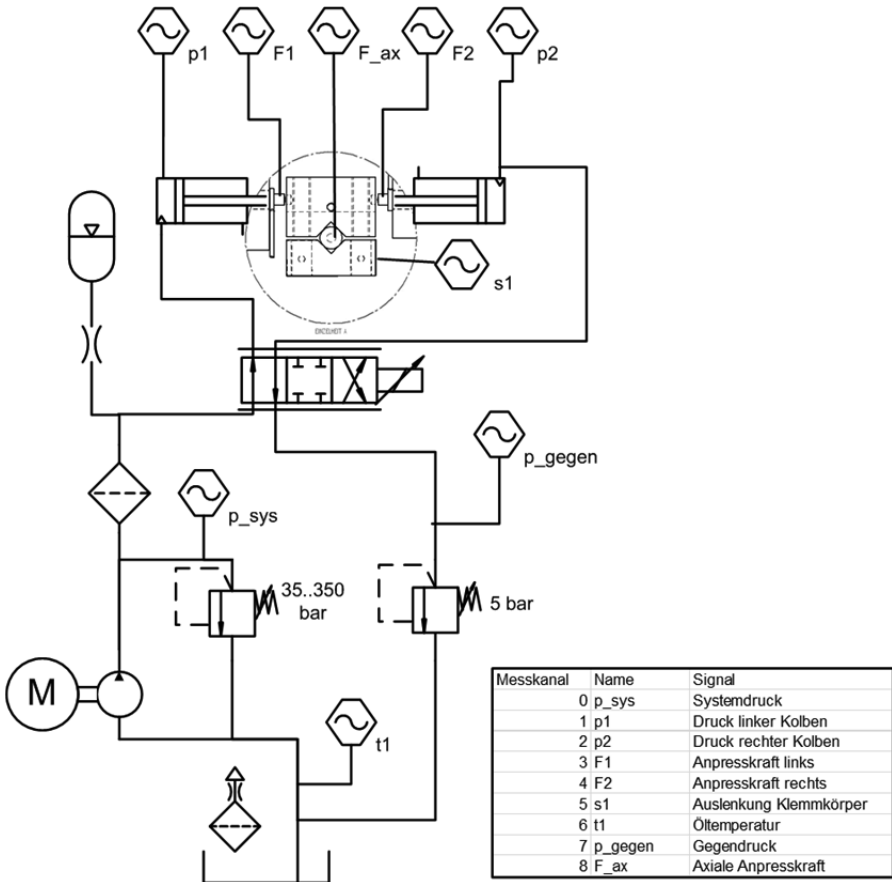


Bild 27: Neuer hydraulischer Schaltplan für Kraftregelung (angelehnt an [Scheu05])

Die Kräfte können hydraulisch getrennt voneinander geschaltet werden. Die Torsion kann einseitig statisch oder als schwellende Last sowie beidseitig als wechselnde Last aufgebracht werden. Die untere Klemmung (6) der Probe ist im Prüfstand integriert, die obere Klemmung (5) ist frei schwebend und wird nur durch die Kolben positioniert (*Bild 28*, rechts).

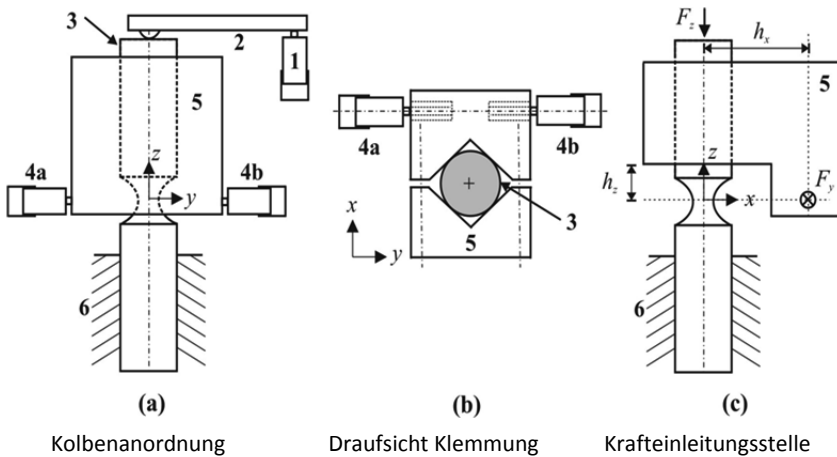


Bild 28: Klemmung der Probe [SCHEU05]

Der Prüfstand wurde aus [SCHEU05] übernommen und im Rahmen der vorliegenden Arbeit mit einer komplett neuen Regelung und zusätzlicher Messtechnik ausgestattet und in Betrieb genommen. Im Vergleich zu [SCHEU05] kann durch Substitution der Schaltventile durch ein Regelventil ein verzögerter Kraftaufbau sichergestellt werden, so dass keine stoßartige Rechtecklast mehr wirkt, sondern eine asymptotisch ansteigende zyklische Last. Ein exemplarischer Belastungsverlauf ist in *Bild 29* gezeigt (gemessene Dehnungen im Kerbgrund mittels Dehnungsmessstreifen sowie Weg bei Torsion der Probe).

Zusätzlich zur indirekten Kraftmessung über die anstehenden Kolbendrucke werden sowohl horizontal als auch axial Kraftmessdosen in den Kraftfluss integriert, um redundant die tatsächlich in die Probe eingeleiteten Kräfte zu messen. Der ursprüngliche Prüfstand wies hohe Reibkräfte in lateraler Richtung durch fehlenden Winkelausgleich auf (siehe Fehlerbeurteilung [SCHEU05]).

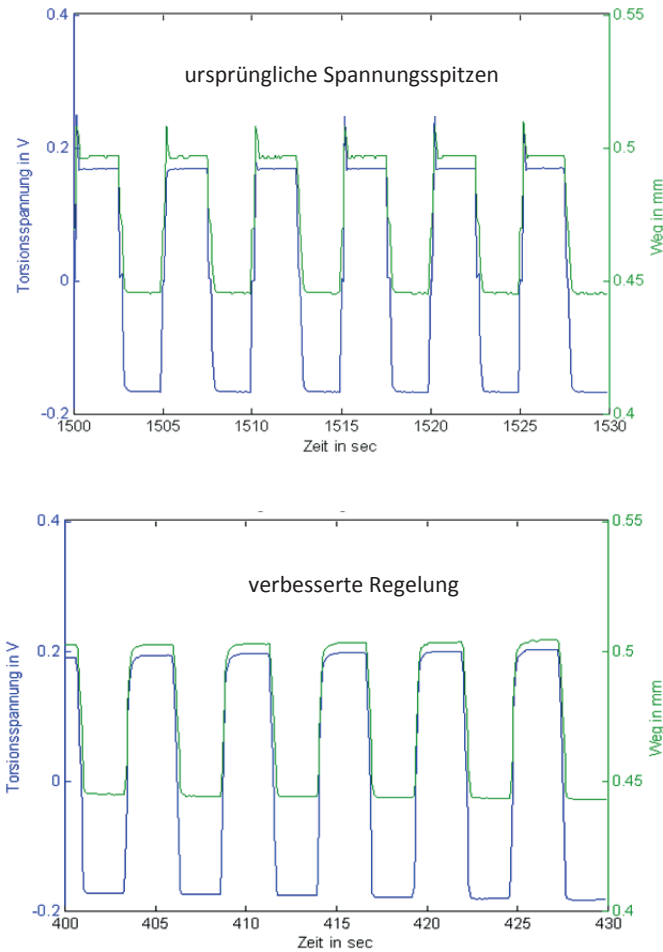


Bild 29: Dehnungs- und Wegmessung an der Probe bei Wechselbeanspruchung bei altem Prüfaufbau (oben) und neuem Prüfaufbau (unten)

Daher wird im neuen Prüfaufbau die horizontale Kolbenbewegung durch ein zusätzliches Tellerfederpaket geführt, um kleine Relativbewegungen zwischen Klemmkörper und Kolben auszugleichen (Bild 30). Zusätzlich wird im neuen Prüfaufbau ein Wegaufnehmer integriert, über den die seitliche Bewegung der oberen Klemmung – und damit indirekt der Drehwinkel, um die die Probe tordiert wird – gemessen werden kann. Das Signal der Wegmessung wird als Grenzwertkontakt zusätzlich für die Abschaltung des Prüfstands genutzt. Erstmals können mit diesem Aufbau Dauerschwingversuche rechtzeitig detektiert werden.

Wie später in den Messergebnissen gezeigt wird, können damit natürliche Anrisse in Keramikproben erzeugt werden, ohne dass der Probekörper während des Versuchs zerstört wird.

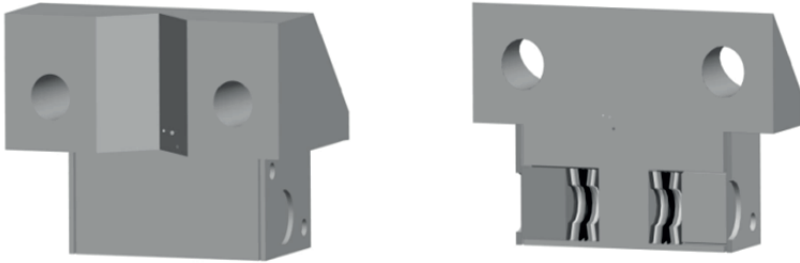


Bild 30: Krafteinleitung über Federpakete zum Winkelausgleich

Die im ursprünglichen Versuchsaufbau erzielten Messergebnisse an ZrO_2 weichen stark von denen des neuen Prüfaufbaus ab, so dass sie nicht in die Auswertung übernommen werden können. Der neu installierte Prüfstand ist in *Bild 31* zu sehen. Eine zusätzlich positionierte Probe soll die kompakte Dimension des Aufbaus veranschaulichen.

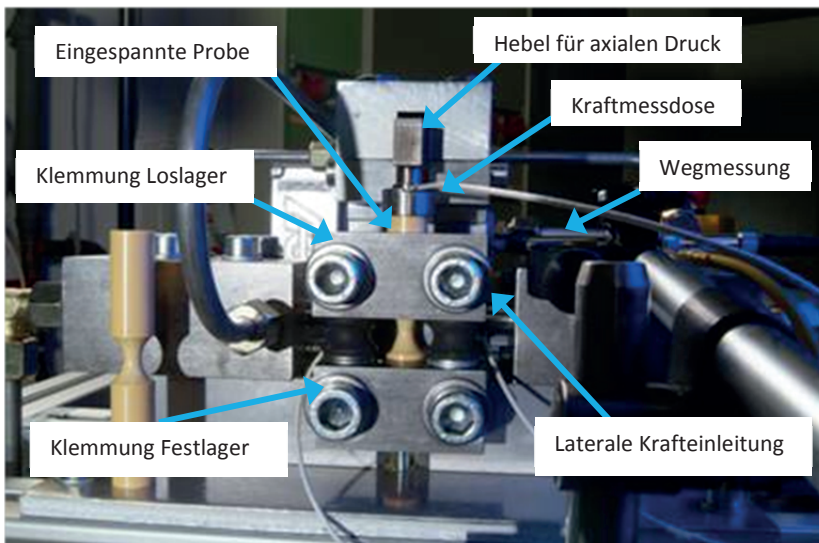


Bild 31: Probe in eingebautem Zustand

3.1.3 Werkstoffauswahl

Im Rahmen dieser Arbeit werden drei unterschiedliche Hochleistungskeramiken untersucht. Auswahlkriterium ist, dass möglichst verschiedene Standardkeramiken gewählt werden. Die Auswahl besteht aus zwei Oxid- sowie einer Karbidkeramik (Tabelle 3).

Tabelle 3: Werkstoffauswahl der Probekörper

| | ZrO_2 | Al_2O_3 (99,7%) | SiC |
|--|--------------------|----------------------|--------------------|
| Drei- bzw. Vier-Punkt-Biegefestigkeit σ_c | 400 MPa (3Pkt.) | 300 MPa (3Pkt.) | 400 MPa (4Pkt.) |
| Weibullmodul m | k. A. | 10 – 15 | 10 |
| Bruchzähigkeit K_{IC} | k. A. | 4,5 MPa \sqrt{m} | 4,0 MPa \sqrt{m} |
| E-Modul | 210 GPa | 300 GPa | 430 GPa |

ZrO_2

Magnesiumverstärktes Zirkoniumoxid mit 4% Magnesiumanteil [PK-ZIR]. Diese Probekörper wurden in [SCHEU05] erstmals untersucht. 30 Stk. wurden zur Kalibrierung des umgebauten Prüfstands sowie für Kurzzeitversuche verwendet.

Al_2O_3

Aluminiumoxid mit einem Aluminiumoxidgehalt über 99,7 % mit der genormten Werkstoffbeschaffenheit C799 [PK-ALU].

SiC

Feinkörniges Siliziumcarbid. Der Werkstoff hat ein Gefüge, das sich durch sehr hohe Steifigkeit und Beständigkeit gegenüber korrosiver Umgebung auszeichnet [PK-SiC].

Die gewählten Keramikwerkstoffe unterscheiden sich wesentlich in ihrem Risswachstum. Während SiC dafür bekannt ist, dass es kein unterkritisches Risswachstum aufweist, ist Aluminiumoxid ein Werkstoff, bei dem eine für Keramik ausgeprägte Risswachstumskurve erwartet wird, einige Werkstoffvarianten mit ausgeprägtem Plateau [MUN01]. Auch ist bekannt, dass diese Keramik eine ausgeprägte R-Kurve aufweist, so dass bei längeren Rissen mit einem risswachstumshemmenden Effekt gerechnet werden kann. Teilstabilisiertes Zirkonium dagegen weist durch den Zusatz von Yttrium unterschiedliche kristalline Phasen auf. Die Teilstabilisierung führt zur Rissüberbrückung. Nach [RIT06] könnten diese Brücken durch die zyklische Last physikalisch aufgebrochen werden, so dass dieser Werkstoff evtl. schneller zyklisch als statisch ermüdet.

Die Hersteller geben üblicherweise nur die Biegefestigkeit an, manchmal zusätzlich den Weibullmodul. Oft wird diese Angabe jedoch ohne die Art der Prüfung gemacht, so dass das belastete effektive Volumen nicht bekannt ist. Eine Aussage über den Risswachstums-exponenten wird generell nicht gemacht. Grund hierfür ist neben dem umfangreichen Prüfaufwand unter anderem die Tatsache, dass die empirisch ermittelten Werte sehr stark streuen [FET00]. Außerdem hängt das statische Risswachstum bei Oxidkeramiken sehr stark von den Umgebungsbedingungen ab.

3.2 Statische Festigkeiten

3.2.1 Ergebnisse der Kurzzeitversuche Al_2O_3 , ZrO_2 und SiC

Mit dem oben beschriebenen Versuchsaufbau wird die Inertfestigkeit von Al_2O_3 , SiC sowie von ZrO_2 jeweils für die Torsionsbelastung mit Druckkraft sowie Torsionsbelastung ohne Druckkraft angelehnt an DIN EN 843-3 ermittelt. Bei Al_2O_3 und SiC werden jeweils 30 Probekörpern verwendet, bei ZrO_2 wird der Versuch an jeweils 10 Probekörpern durchgeführt. Bei der Versuchsdurchführung werden die Proben mit einer ansteigenden Lastrampe bis zum Bruch tordiert. Alle Kurzzeitversuche sind in den folgenden Diagrammen (Bild 32), (Bild 33) und (Bild 34) dargestellt.

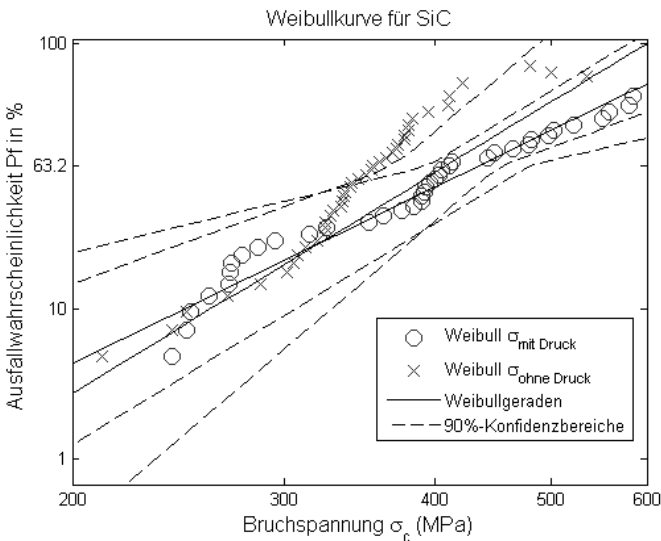


Bild 32: Kurzzeitversuche an SiC [USB11]

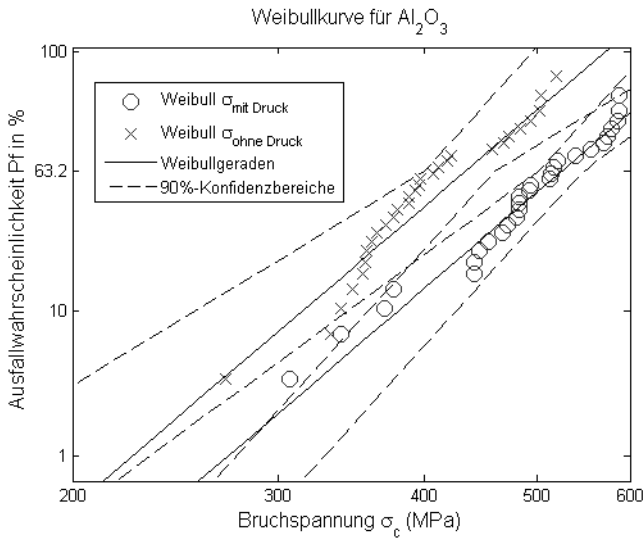
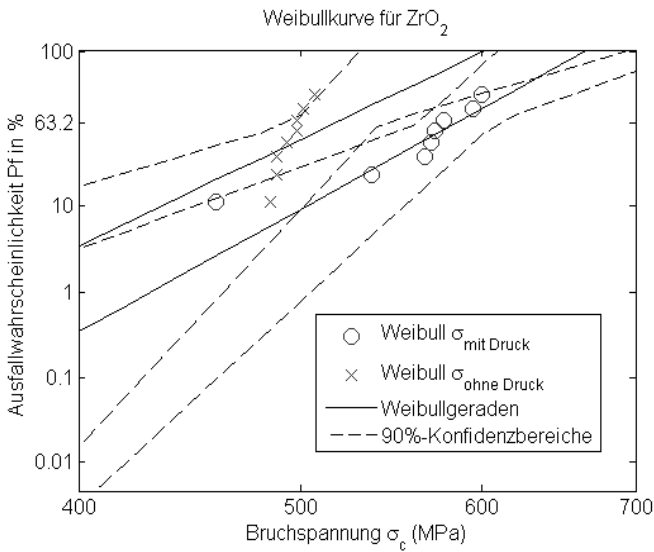


Bild 33: Kurzzeitversuche an Aluminiumoxid [Usb11]

Bild 34: Kurzzeitversuche an Restbeständen ZrO_2 [Usb11]

Als Bezugsspannung σ^* wird die mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) ermittelte, maximal im Bauteil auftretende Hauptnormalspannung σ_I gewählt, so dass sich für die Weibullverteilung folgende Gleichung ergibt:

$$P_A(\sigma^*) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\sigma^*}{\sigma_c^*}\right)^m\right) \quad \text{nach \{4\}}$$

mit der maximal auftretenden Hauptnormalspannung als Bezugsspannung ($\sigma^* = \sigma_I$). Es ergeben sich die in *Tabelle 4* angegebenen Werkstoffkennwerte und Konfidenzintervalle für die untersuchten Werkstoffe. Alle Versuche sind zusätzlich in Anhang A1 aufgelistet.

Tabelle 4: Ergebnisse der Kurzzeitversuche (Belastung bis zum Bruch)

| Belastungsart | Versuchsgröße | SiC | ZrO₂ | Al₂O₃ |
|--------------------------|--------------------------|------------|------------------------|------------------------------------|
| Reine Torsion | Bruchspannung σ_c | 408 MPa | 517 MPa | 438 MPa |
| | 90%-Konfidenzintervall | [370; 452] | [496; 542] | [415; 456] |
| | Weibullmodul m | 3,6 | 12,8 | 6,9 |
| | 90%-Konfidenzintervall | [2,8; 4,7] | [8,0; 29,0] | [5,4; 8,8] |
| Torsion und Druck | Bruchspannung σ_c | 445 MPa | 584 MPa | 524 MPa |
| | 90%-Konfidenzintervall | [408; 485] | [563; 607] | [502; 547] |
| | Weibullmodul m | 4,0 | 15,3 | 7,6 |
| | 90%-Konfidenzintervall | [3,0; 5,3] | [9,6; 24,9] | [5,9; 9,7] |

Die Weibullmoduln m spiegeln die Streuung des Materials wieder. Die Werkstoffstreuung ist von der Belastungssituation unabhängig. Die Konfidenzintervalle für den Weibullmodul mit und ohne Druckkraft entsprechen sich daher. Gleichzeitig kann davon ausgegangen werden, dass durch die unterschiedliche Lastaufbringung keinerlei zusätzliche Streuung in die Messungen eingebracht wird. Die ermittelten Bezugsspannungen $\sigma_{0,mit\ Druck}^*$ und $\sigma_{0,ohne\ Druck}^*$ entsprechen jedoch nicht der gleichen Grundgesamtheit, da die Bruchspannung abhängig vom sogenannten effektiven Volumen V_{eff} ist (siehe Kapitel 2.2). Das Spannungsverhältnis der charakteristischen Bauteilfestigkeiten mit und ohne Druckbeanspruchung berechnet sich zu:

Zirkonoxid

$$\frac{\sigma_{0,mit\ Druck}^*}{\sigma_{0,ohne\ Druck}^*} = 1,13$$

Aluminiumoxid

$$\frac{\sigma_{0,mit\ Druck}^*}{\sigma_{0,ohne\ Druck}^*} = 1,20$$

Siliziumcarbid

$$\frac{\sigma_{0,mit\ Druck}^*}{\sigma_{0,ohne\ Druck}^*} = 1,09$$

Trotz der hohen Festigkeitsstreuung wird deutlich, dass die unter Druck ermittelte Bruchspannung im Durchschnitt 10 % bis 20 % höher ausfallen als Proben unter reiner Torsion.

Wenn das gemessene Bruchniveau nicht anhand der Maximalspannungen normiert wird, sondern das Torsionsmoment angeführt wird, bei dem die Probe zu Bruch geht, erhält man einen Quotienten von

Zirkonoxid

$$\frac{M_{Torsion,mit\ Druck}}{M_{Torsion,ohne\ Druck}} = 1,33$$

Aluminiumoxid

$$\frac{M_{Torsion,mit\ Druck}}{M_{Torsion,ohne\ Druck}} = 1,42$$

Siliziumcarbid

$$\frac{M_{Torsion,mit\ Druck}}{M_{Torsion,ohne\ Druck}} = 1,28$$

Während für die Werkstoffuntersuchungen das Spannungsverhältnis $\frac{\sigma_{0,mit\ Druck}^*}{\sigma_{0,ohne\ Druck}^*}$ relevant ist, zeigt die Gegenüberstellung der tatsächlich eingeleiteten Torsionsmomente $\frac{M_{Torsion,mit\ Druck}}{M_{Torsion,ohne\ Druck}}$ das konstruktive Potenzial, dass keramische Bauteile bei überlagerten Druckeigenstressungen aufweisen.

3.2.2 Ermittelte effektive Volumina und Oberflächen

Die effektiven Volumina werden gemäß Kapitel 2.2 unter Annahme einer bestimmten Versagenshypothese bestimmt. Dazu wird ein FEM-Modell erstellt, mit dem die Spannungen im Bauteil ermittelt werden. In jedem finiten Element wird dann die Vergleichsspannung gebildet und gegebenenfalls über den Raumwinkel integriert. Danach werden die Vergleichsspannungen der Elemente – nach dem Elementvolumen gewichtet – aufsummiert.

Für den Vergleich der Festigkeit zweier Bauteile (mit dem Volumen $V_{1,eff}$ bzw. $V_{2,eff}$) aus gleichem, durch den Weibullkoeffizienten m gekennzeichnetem Material ergibt sich ein Festigkeitsverhältnis σ_1^*/σ_2^* entsprechend folgender Gleichung aus Kapitel 3:

$$\left(\frac{\sigma_1^*}{\sigma_2^*}\right) = \left(\frac{V_{2,eff}}{V_{1,eff}}\right)^{\frac{1}{m}} \quad \{20'\}$$

Analog gilt bei der Betrachtung der Oberflächen als Rissursprung die Gleichung

$$\left(\frac{\sigma_1^*}{\sigma_2^*}\right) = \left(\frac{S_{2,eff}}{S_{1,eff}}\right)^{\frac{1}{m}} \quad \{21'\}$$

Um den Einfluss der Versagenshypothesen auf die theoretischen Volumina abzuschätzen, wurden mit dem Postprozessor STAU zu den Al_2O_3 -Versuchen unterschiedliche Hypothesen zu Grunde gelegt, nachdem der Spannungsverlauf mit ABAQUS ausgewertet wurde. Es werden neben den üblichen Normalspannungshypothesen auch Versagenshypothesen untersucht, bei denen die Schubspannungen einen wesentlichen Einfluss haben.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine NPT-Probe mit dem Programm STAU numerisch untersucht. Es wurden verschiedene Versagenshypothesen und ein Weibullmodul von $m = 19$ angenommen und für die zwei Spannungsverläufe jeweils die effektiven Volumina berechnet. Diese wurden dann miteinander ins Verhältnis gesetzt, und gemäß Gleichung {20'} mit dem gemessenen Spannungsquotient verglichen.

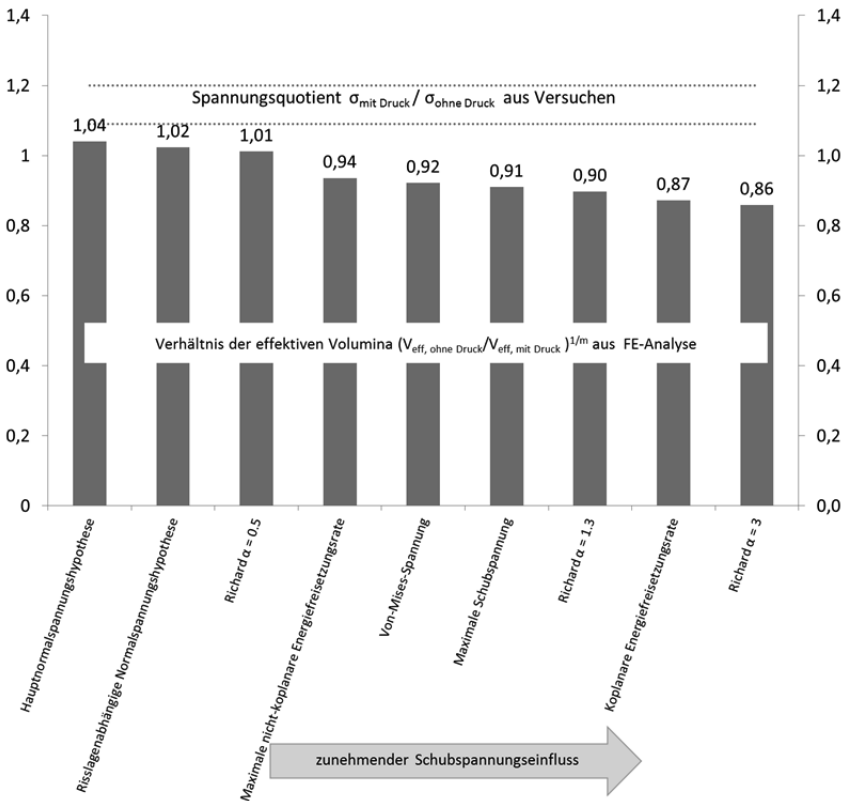


Bild 35: Ermittlung der effektiven Volumina an NPT-Proben unter verschiedenen Hypothesen [Usb09]

Die Hypothesen sind in Bild 35 nach zunehmendem Schubspannungseinfluss von links nach rechts sortiert. Alle Hypothesen, die die Schubspannung berücksichtigen, weisen ein umgekehrt proportionales Verhältnis zwischen den Bruchspannungen $\frac{\sigma_{0,\text{mit Druck}}^*}{\sigma_{0,\text{ohne Druck}}^*} < 1$ auf. Die Messergebnisse zeigen jedoch eindeutig, dass die zusätzlich mit Druck beaufschlagten Proben höhere Bruchfestigkeiten aufweisen, d.h. $\frac{\sigma_{0,\text{mit Druck}}^*}{\sigma_{0,\text{ohne Druck}}^*} > 1$.

Die Annahme, dass Schubspannungen für die makroskopische Betrachtung und damit die Auslegung von keramischen Bauteilen keine signifikante Rolle spielen, wird hier bestätigt. Als Versagenskriterium ist demnach die Hauptnormalspannung anzuwenden. Weitere Vergleichsrechnungen mit effektiven Oberflächen sind in [NoH10] veröffentlicht.

3.2.3 Bewertung von mehraxialen Hauptnormalspannungen

Die Hauptnormalspannungshypothese ohne und mit Integration über den Riss weichen bei der Berechnung mit dem Postprozessor STAU erheblich voneinander ab. Ein wesentlicher Unterschied zwischen der Betrachtung der maximalen Hauptnormalspannung (**HNS**) und der über dem Raumwinkel integrierten Normalspannung (**NSmR**) besteht in der Bewertung der zweiten und dritten Hauptspannung. Neben dem mehraxialen Spannungsverlauf geht auch der Weibullmodul in die Berechnung des effektiven Volumens ein. Der Postprozessor STAU berücksichtigt die Hypothese der voneinander unabhängig wirkenden Hauptspannungen (**PIA**) nicht. Diese bildet für den mehrdimensionalen Belastungsfall eine Vergleichsspannung aus den drei Hauptspannungen. Für die Probengeometrie aus dem Versuch werden für alle drei Hypothesen

- I: Maximale Hauptnormalspannung (**HNS**)
- II: Normalspannungen über den Risswinkel integriert (**NSmR**)
- III: Principle of Independent Action (**PIA**)

in Abhängigkeit vom Weibullmodul jeweils der Quotient der effektiven Volumina sowie der effektiven Oberflächen gebildet. Es wird diesmal eine feinere Vernetzung gewählt als bei der ersten Berechnung, um kleinere Unterschiede aufzeigen zu können.

Die Versuche weisen darauf hin, dass die über den Raumwinkel integrierte Normalspannungshypothese (**NSmR**) die Versuchsergebnisse besser abbildet, als die einfache Hauptnormalspannung. Die Hypothese **PIA**, die auch die 2. und 3. dritte Hauptspannung mit berücksichtigt, stimmt in Belastungsfall des Versuchsstands mit der Hypothese **HNS** überein, da unter Torsionsbedingungen die 2. und 3. Hauptspannung wesentlich kleiner sind als die 1. Hauptspannung. Auf die Hypothesen wird in Kapitel 4 näher eingegangen. Die rechnerischen Spannungsverhältnisse sind für alle drei Hypothesen in Abhängigkeit vom Weibullmodul in *Tabelle 5* aufgeführt.

Tabelle 5: Berechneter Spannungsquotient aus effektiven Oberflächen bzw. Volumina

| | $\left(\frac{V_{eff,ohne\ Druck}}{V_{eff.mit\ Druck}}\right)^{1/m} = \frac{\sigma_{mit\ Druck}}{\sigma_{ohne\ Druck}}$ | | | | | $\left(\frac{S_{eff,ohne\ Druck}}{S_{eff.mit\ Druck}}\right)^{1/m} = \frac{\sigma_{mit\ Druck}}{\sigma_{ohne\ Druck}}$ | | | | |
|------------------|--|-------|-------|-------|-------|--|-------|-------|-------|-------|
| Weibull m | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| HNS | 1,036 | 1,018 | 1,011 | 1,008 | 1,006 | 1,018 | 1,011 | 1,008 | 1,006 | 1,005 |
| NSmR | 1,060 | 1,028 | 1,018 | 1,013 | 1,009 | 1,038 | 1,021 | 1,014 | 1,011 | 1,009 |
| PIA | 1,036 | 1,018 | 1,011 | 1,008 | 1,006 | 1,018 | 1,011 | 1,008 | 1,006 | 1,005 |

3.2.4 Bruchbilder und Festigkeitshypothesen

Die Versagensarten „Trennbruch“ spröder Werkstoffe nach Normalspannungshypothese und „Scherbruch“ duktiler Werkstoffe nach Schubspannungshypothese sind in *Bild 36* für reine Torsion veranschaulicht.

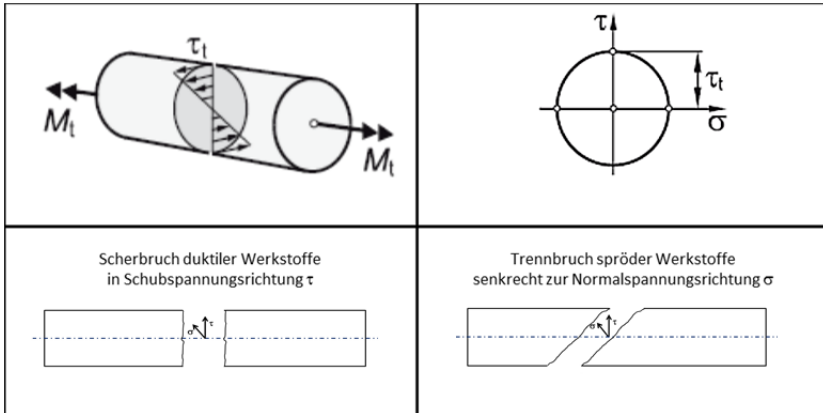


Bild 36: Spannungszustand und Bruchbilder unter reiner Torsion, angelehnt an [LÄP11]

Die Hauptnormalspannungsrichtung kann auch im numerischen Modell der Probe dargestellt werden. Eine solche FE-Analyse ist in *Bild 37* am Beispiel einer vernetzten NPT-Probe dargestellt. Die ersten Hauptnormalspannungen sind farblich als Vektoren in Größe und Richtung im FE-Netz eingeblendet.

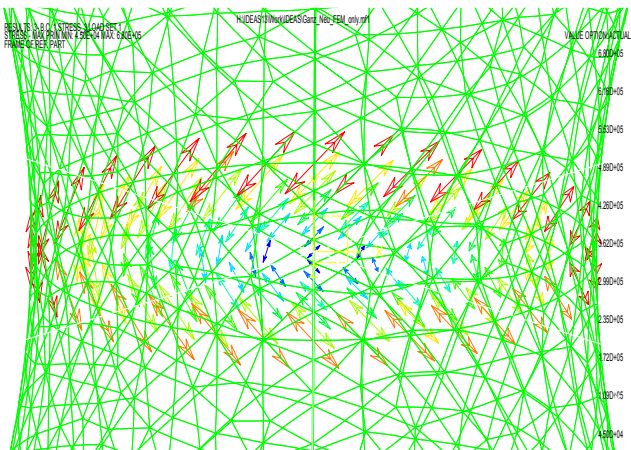
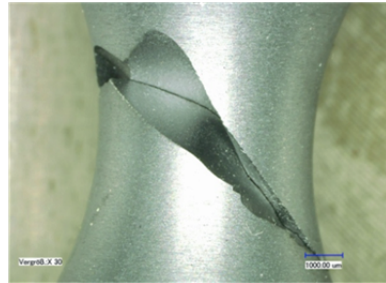


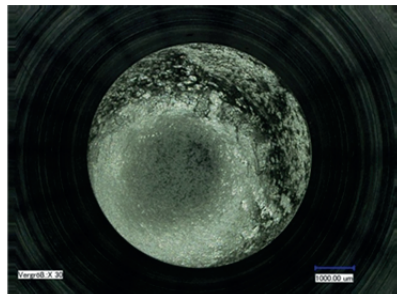
Bild 37: Hauptspannungsrichtung in NPT-Probe unter reiner Torsion

In *Bild 38* ist das Bruchbild der keramischen Proben dem Bruchbild einer Probe aus Aluminiumlegierung gegenübergestellt.

Es wird deutlich, dass die metallische Legierung in Richtung der höchsten Schubspannung abscheren, während die keramischen Proben unter 45° senkrecht zur größten Hauptnormalspannung brechen. Die Bruchbilder bestätigen die Normalspannungshypothese für die Ermittlung der effektiven Volumina respektive Oberflächen.



Aluminiumoxid - Keramikbruch unter reiner Torsion - Siliziumcarbid



Aluminium - metallischer Bruch unter reiner Torsion - Aluminium

Bild 38: Bruchbilder von Keramik und Metall unter reiner Torsion

Bei Torsionsbeanspruchung mit zusätzlich axialem Druck erhält man einen etwas kleineren Bruchwinkel von 41° . Dieser kann sowohl analytisch bestimmt, als auch im FE-Modell ausgelesen werden (*Bild 39*).

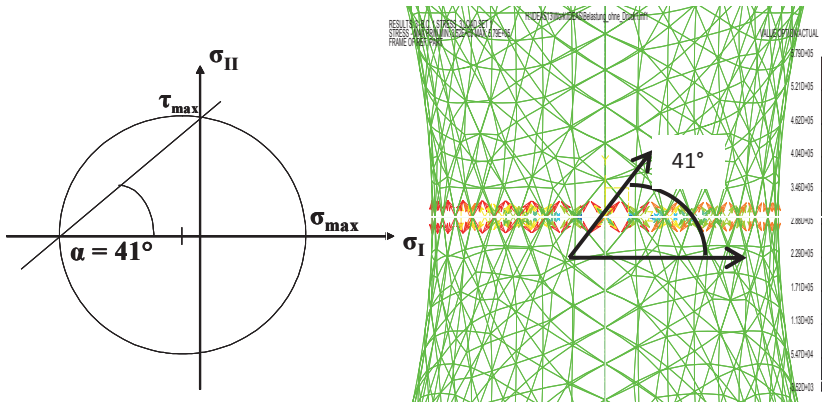


Bild 39: Hauptnormalspannung in der Einschnürung bei Torsions-Druck-Belastung

3.3 Messungen zur Schwingfestigkeit

Es werden sowohl wechselnde als auch schwellende Torsionsbeanspruchungen eingeleitet und beim zweiten Belastungsfall mit konstanter axialer Druckspannung überlagert. Auch hier werden die beiden Beanspruchungszustände am geometrisch identischen Probekörper miteinander verglichen. Bekanntlich kann durch zusätzliche Druckspannungen das Festigkeitsverhalten bei keramischen Bauteilen verbessert werden. Der Einfluss von überlagerten Druckspannungen wird daher auch in Schwingfestigkeitsuntersuchungen untersucht. Die Auswertung findet im Zeitfestigkeitsbereich durch horizontale Kollektive statt, im Übergangs- und Dauerfestigkeitsbereich wird das bekannte Treppenstufenverfahren angewendet. Alle Versuche sind zusätzlich in Anhang A1 aufgelistet.

3.3.1 Ergebnisse der zyklischen Untersuchungen an Al_2O_3

Die ermittelten Bruchfestigkeiten der Aluminiumoxidproben sind in einem Wöhlerdiagramm dargestellt. Das Aluminiumoxid weist ein hohes Risswachstum während der zyklischen Beanspruchung auf. Die Dauerfestigkeit liegt bei etwa einem Drittel der Inertfestigkeit (siehe Bild 40). Unter Wechselbeanspruchung wird der Zeitfestigkeitsbereich näher untersucht. Die Wöhlerkennlinie weist mit $k \approx 20$ im Vergleich zu Metallen eine niedrige Steigung auf. Als Grenzlasterpielzahl wird eine Schwingpielzahl von $N = 2,3 \cdot 10^6$ angenommen. Tatsächlich treten bei $R = 0$ (Schwellbeanspruchung) nur zwei Brüche oberhalb von $N = 10^5$ auf, so dass für die technische Auslegungen von einem Dauerfestigkeitsbereich ausgegangen werden kann (Bild 41). Der Übergangsbereich bei $R = -1$ (Wechselbeanspruchung) liegt mit $N \approx 10^6$ bei etwas höheren Zyklenzahlen.

Die Diagramme zeigen eine erhöhte Kurzzeitfestigkeit bei überlagerter Druckbeanspruchung. Das Verhältnis von $\sigma_{c,mit\ Druck}/\sigma_{c,ohne\ Druck} \approx 1,09..1,20$ kann wiederholt bei den unterschiedlichen Keramiken festgestellt werden [Usb10].

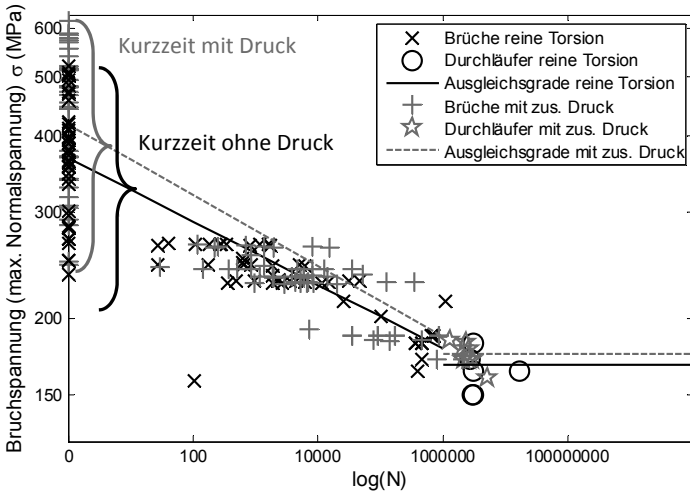


Bild 40: Wöhlerlinien Wechsellast Al_2O_3 99,7%, $R = -1$

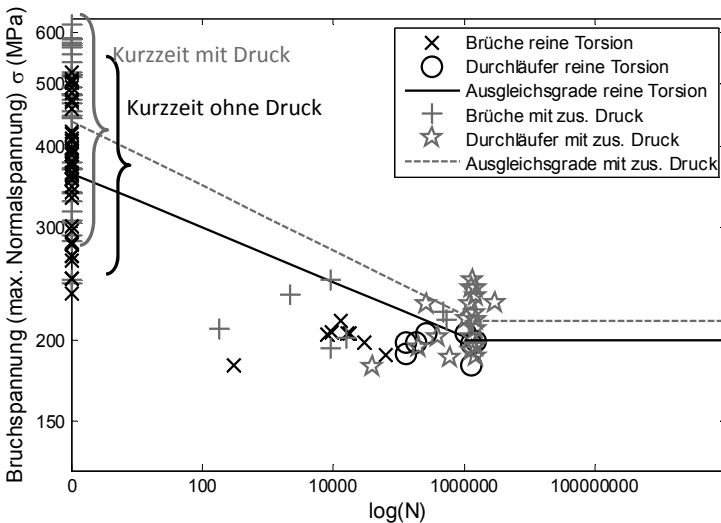


Bild 41: Wöhlerlinie Schwelllast Al_2O_3 99,7%, $R = 0$

Das Verhältnis spiegelt das höhere effektive Volumen bzw. die höhere effektive Oberfläche wieder, die durch die zusätzliche Druckspannung erzielt wird. Dieses Verhältnis zwischen reiner Torsionsspannung und Torsionsspannung mit überlagertem Druck besteht bei der Dauerfestigkeit von Al_2O_3 nicht mehr. Die Ergebnisse sind in *Tabelle 6* zusammengefasst.

Tabelle 6: Ermittelte Festigkeiten Al_2O_3

| alle Angaben in MPa | $\sigma_{c,mit\ Druck}$ | [10%;90%] | $\sigma_{c,ohne\ Druck}$ | [10%;90%] | $\frac{\sigma_{c,mit\ Druck}}{\sigma_{c,ohne\ Druck}}$ |
|-------------------------------|-------------------------|------------|--------------------------|-----------|--|
| Kurzzeitfestigkeit | 524 | [495;553] | 434 | [415;455] | 1,20 |
| Dauerfestigkeit R = -1 | 175 | [160;190] | 179 | [159;199] | 0,98 |
| Dauerfestigkeit R = 0 | 214 | [198; 230] | 200 | [187;213] | 1,07 |

3.3.2 Ergebnisse der zyklischen Untersuchungen an SiC

Während sich bei Aluminiumoxid ein eindeutiger Zeitfestigkeitsbereich herausbildet, treten bei Siliziumcarbid nur selten Brüche während der zyklischen Beanspruchung auf. Die meisten Proben brechen bereits beim Anfahren. Wenn sie nicht nach wenigen Zyklen brechen, sind sie überwiegend dauerfest. Bei wechselnder Beanspruchung treten etwas mehr Zeitfestigkeitsbrüche auf. Das mit Treppenstufenverfahren ermittelte Dauerfestigkeitsniveau liegt jedoch innerhalb des Vertrauensbereiches der statischen Weibullstreuung.

In *Bild 42* und *Bild 43* sind jeweils die Kurzzeitfestigkeiten und der 50%-Mittelwert des Dauerfestigkeitsbereichs eingetragen. Hier wird sichtbar, dass keine nennenswerte mechanische Ermüdung bei Siliziumcarbid vorhanden ist. Der Streubereich für die Kurzzeitfestigkeit umfasst alle Bruchspannungen, die während der zyklischen Beanspruchung aufgetreten sind. Das Ergebnis stimmt damit mit den Untersuchungen von [SON92] an Siliziumnitrid überein, bei denen keine wesentliche Ermüdung durch zyklische Beanspruchungen auftreten und die Wöhlerlinie im Streuband der statischen Festigkeitswerte liegt.

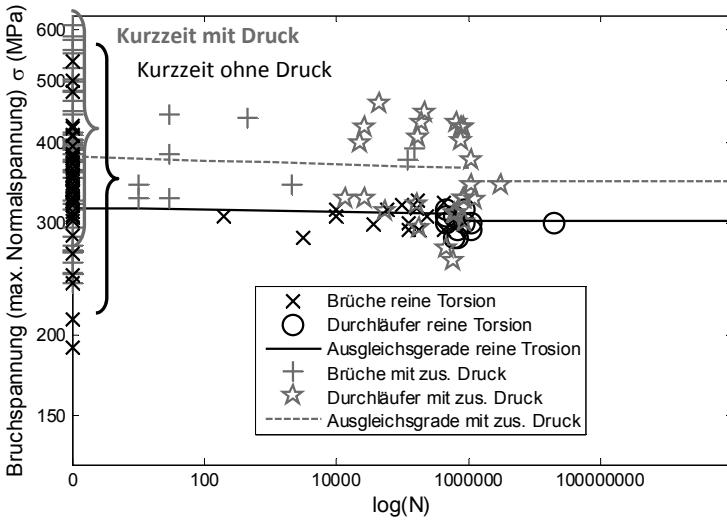


Bild 42: Wöhlerlinie Wechsellast SiC, $R = -1$

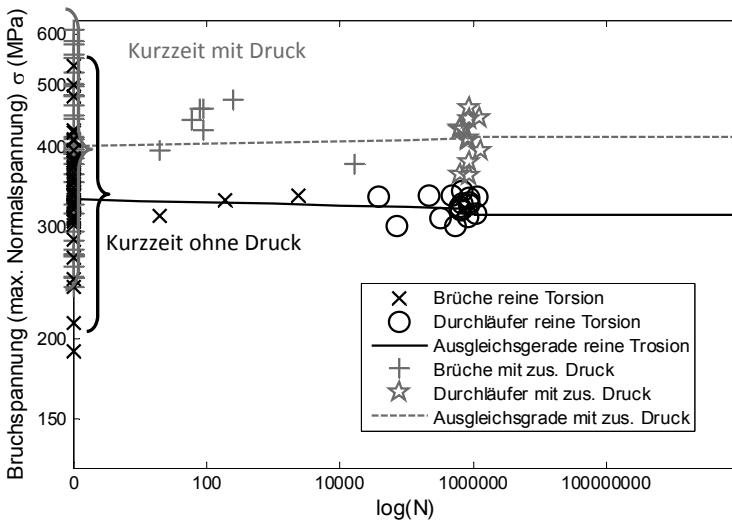


Bild 43: Wöhlerlinie Schwelllast SiC, $R = 0$

Die Festigkeitsbereiche sind in *Tabelle 7* zusammengefasst. Hier wird deutlich, dass auch die ursprünglich vorhandene Festigkeitssteigerung durch die zusätzliche Druckbeanspruchung während der zyklischen Beanspruchung weitgehend vorhanden bleibt. Dieses weist darauf hin, dass keinerlei Werkstoffveränderungen während der zyklischen Beanspruchung stattfinden, während bei Aluminiumoxid sich der Versagensmodus durch die zyklische Beanspruchung verändert. Die Übertragbarkeit von dynamischen Versuchen auf zyklische Ermüdung ist in diesem Fall zu hinterfragen.

Tabelle 7: Ermittelte Festigkeiten SiC

| <i>alle Angaben in MPa</i> | $\sigma_{c,mit\ Druck}$ | [10%;90%] | $\sigma_{c,ohne\ Druck}$ | [10%;90%] | $\frac{\sigma_{c,mit\ Druck}}{\sigma_{c,ohne\ Druck}}$ |
|-------------------------------|-------------------------|-----------|--------------------------|-----------|--|
| Kurzzeitfestigkeit | 445 | [408;485] | 408 | [415;455] | 1,09 |
| Dauerfestigkeit R = -1 | 348 | [281;416] | 302 | [159;199] | 1,15 |
| Dauerfestigkeit R = 0 | 360 | [285;434] | 313 | [187;213] | 1,15 |

3.3.3 Ermittlung der bruchmechanischen Parameter

Üblicherweise wird die Lebensdauer für Keramiken über das unterkritische Risswachstum berechnet. Hierbei wird von einem logarithmischen Zusammenhang zwischen Belastungszeit und Bruchspannung ausgegangen ([MUN01], Gl. 5.44):

$$\log(t_f) = -n \log \sigma + \log[B \sigma_c^{n-2}] \quad \{46\}$$

(t_f : Zeitpunkt des Bruches, σ : anliegende Spannung, σ_c : Inertfestigkeit, B : bruchmechanische Materialkonstante, n : Risswachstumskoeffizient).

Durch Messungen unterschiedlicher Spannungsraten gem. DIN EN 843-3 können die Parameter n und B für jeden Werkstoff bestimmt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Messungen mit unterschiedlichen Lastanstiegsraten unter Torsion für Aluminiumoxid und Siliziumcarbid durchgeführt. Die Ergebnisse der gemessenen Bruchspannungen sind in *Bild 44* und *Bild 45* aufgetragen.

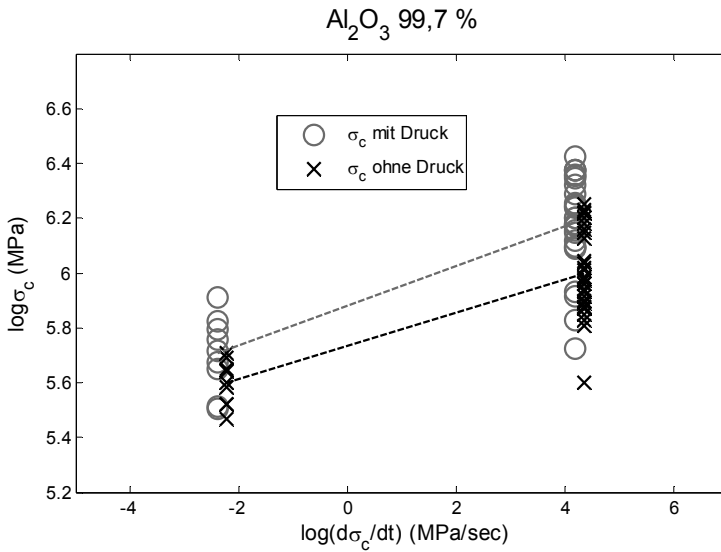


Bild 44: Risswachstumsraten für Aluminiumoxid unter Torsionsrampe ermittelt

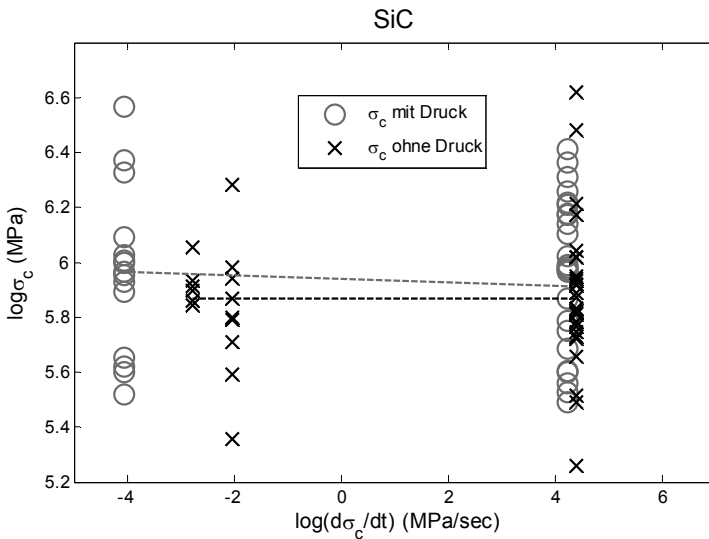


Bild 45: Risswachstumsraten für Siliziumcarbid unter Torsionsrampe ermittelt

Siliziumcarbid weist eine hohe Festigkeitsstreuung auf, ohne dass bei langsamerer Belastungsgeschwindigkeit eine sichtbare Festigkeitsabnahme zu verzeichnen ist. Es liegt keine eindeutige Steigung vor, so dass keine Risswachstumsexponenten ermittelt werden kann. Bei Al_2O_3 lässt sich der Risswachstumsexponent mit $n = 9,8..11,9$ berechnen.

3.3.4 Lebensdauerberechnung versus Wöhlerkennlinie

Obwohl beide Keramiken ähnliche Festigkeitswerte K_{IC} , m und σ_c aufweisen, müssen sie wegen des abweichenden Risswachstums konstruktiv unterschiedlich behandelt werden. Daher soll im Folgenden ein Vergleich mit den geltenden Berechnungsvorschriften für keramische Werkstoffe gezogen werden. Durch Messungen unterschiedlicher Spannungsraten gem. DIN EN 843-3 können die Parameter n und B für jeden Werkstoff bestimmt werden. Die Lebensdauer unter zyklischer Belastung t_{fc} kann über die folgende Gleichung nach ([MUN01], Gl. 5.19 ff.)

$$t_{fc} = \frac{1}{h\left(n, \frac{\sigma_m}{\sigma_a}\right)} \cdot B \cdot \sigma_c^{n-2} \cdot \sigma_a^{-n} \quad \{47\}.$$

unter Berücksichtigung des sinusförmigen Beanspruchung berechnet werden. Die mit Hilfe der bruchmechanischen Parameter n und B berechneten ertragbaren Spannungen sind unter Annahme einer sinusförmigen Prüffrequenz von $f = 5 \text{ Hz}$ für Al_2O_3 in die Wöhlerdiagramme *Bild 46* und *Bild 47* eingetragen.

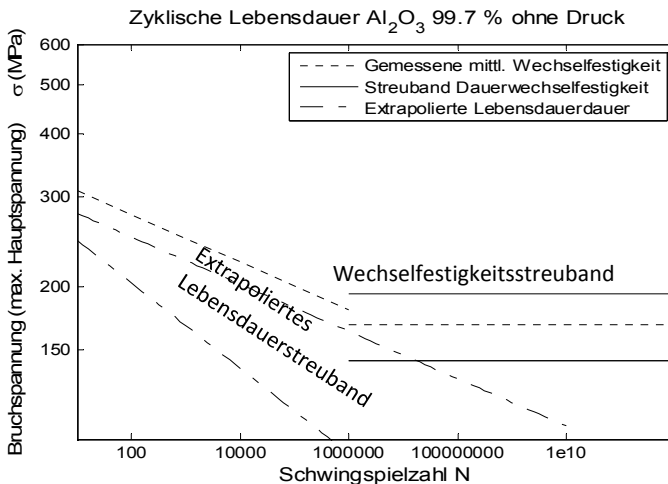


Bild 46: Gemessene Wechselfestigkeit und extrapolierte Lebensdauer von Al_2O_3 ohne zusätzlichen Druck ($R = -1$)

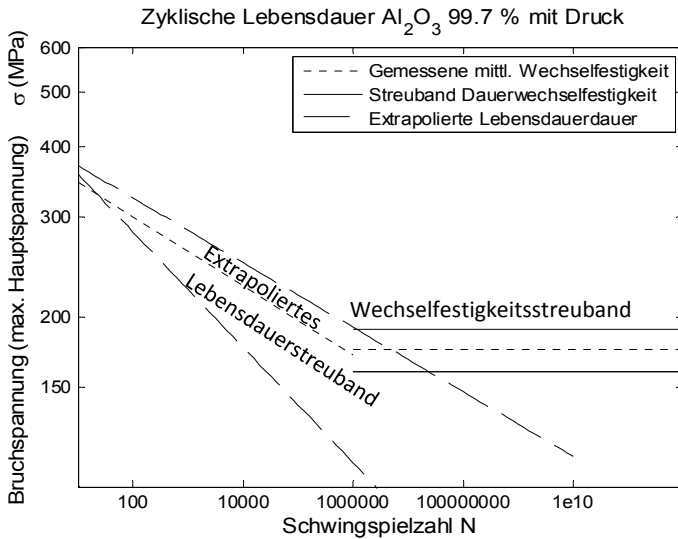


Bild 47: Gemessene Wechselfestigkeit und extrapolierte Lebensdauer von Al_2O_3 mit zusätzlichem Druck ($R = -1$)

Aufgrund der Messunsicherheit bei der Ermittlung der Risswachstumscoeffizienten erhält man einen relativ großen Lebensdauerbereich für die analytische Berechnung. Durch die Annahme, dass die Paris-Gleichung über den gesamten Spannungsbereich gilt, wird das Risswachstum für kleine Spannungen außerdem zu hoch angenommen. Gerade in den Größenordnungen, die für den Maschinenbau typisch sind ($N = 10^6 \dots 10^{10}$) werden analytisch durch die lineare Extrapolation zu geringe Lebensdauern ermittelt [USB10], [KRA11]. Die Abweichung zwischen den empirischen Wechselfestigkeitsberechnung durch Extrapolation der Risswachstumsdaten ist in *Bild 48* schematisch veranschaulicht.

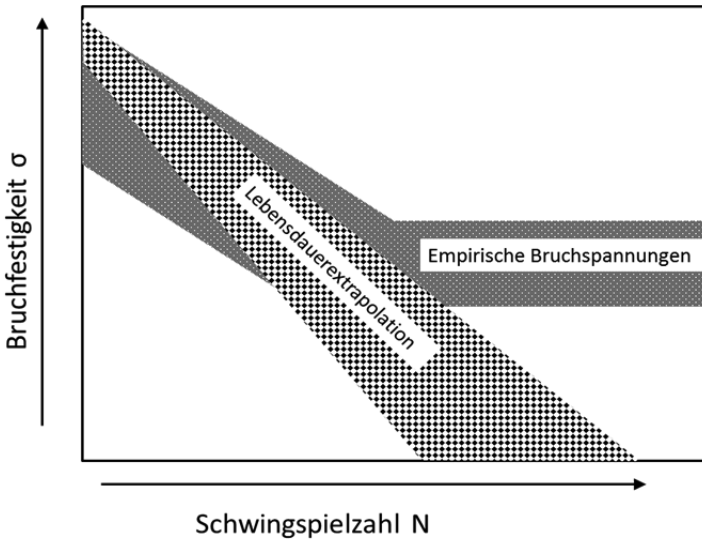


Bild 48: Extrapolation des Risswachstums und empirische Festigkeitswerte

3.3.5 Zyklisches und statisches Risswachstum unterschiedlicher Keramikwerkstoffe

In den zyklischen Versuchen wird das unterschiedliche Verhalten von keramischen Werkstoffen deutlich. Während Aluminiumoxid mit niedrigem Risswachstumsexponenten unterkritisches Risswachstum aufweist, erweist sich Siliziumkarbid unter zyklischer Beanspruchung als dauerfest. Dieses Verhalten stimmt nicht mit den Wöhlerkennlinien vom [Son92], der für Si_3N_4 und Al_2O_3 sehr flache Wöhlerkennlinien und damit gegenüber der Werkstoffstreuung vernachlässigbare Ermüdungsvorgänge ermittelt hat. Eine Erklärung ist, dass Aluminiumoxid in verschiedenen Varianten mit unterschiedlich stark ausgeprägtem unterkritischem Risswachstum hergestellt wird. Es bestätigt sich die Aussagen von [Rit03], dass neue Keramikwerkstoffe mit verbesserten Zähigkeitseigenschaften stärker zu zyklisch induziertem Risswachstum neigen. Die Zusammenhänge werden in der Zusammenstellung Bild 49 und Bild 50 noch einmal verdeutlicht.

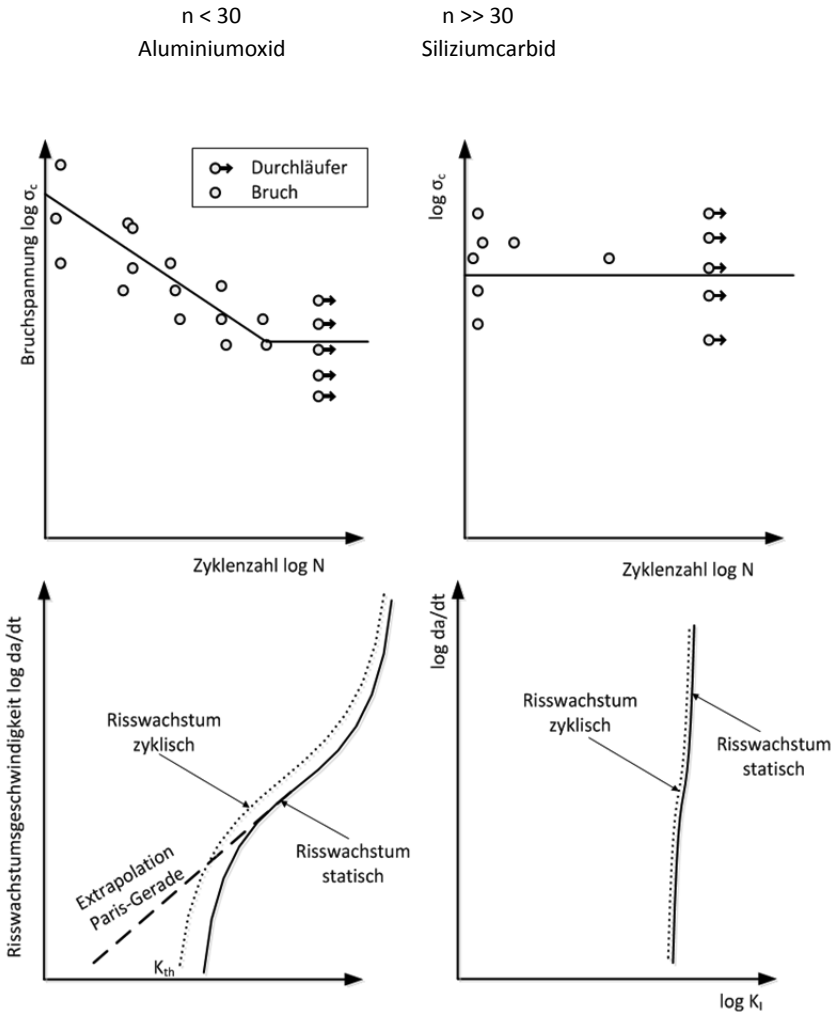


Bild 49: Wöhlerlinien und Risswachstum für ermüdende (links) und nicht ermüdende Keramik (rechts)

In Bild 49 sind Wöhlerkennlinie und Risswachstumskurve einer ermüdenden und nicht ermüdenden Keramik qualitativ zusammengefasst. Bei Siliziumcarbid kann in den Wöhlerversuchen kein Zeitfestigkeitsbereich ermittelt werden. Die Bruchspannungen liegen nach zyklischer Beanspruchung auf gleichem Niveau wie die Kurzzeitbrüche. Bei Betrachtung der Risswachstumskurve liegt kein Plateau oder ausgeprägtes Risswachstumsgebiet (Bereich II: kontrollierte Rissausbreitung) vor, so dass ein Überschreiten des K_I -Wertes sofort zum

Bruch führt. Bei Aluminiumoxid liegt das Dauerfestigkeitsniveau der Wöhlerkurve unterhalb des Streubandes der Kurzzeitfestigkeit. Es liegt bei der Risswachstumskurve ein Bereich der kontrollierten Rissausbreitung vor.

Dieser Bereich kann rechnerisch genutzt werden, um einen Risswachstumsexponenten n nach der Gleichung

$$v = \frac{da}{dt} = A \cdot K_I^n \quad \{\text{siehe 33}\}$$

zu ermitteln. Eine zyklische Beanspruchung wirkt beschleunigend auf das Risswachstum, die gepunktete Linie für zyklisches Risswachstum befindet sich daher oberhalb der statischen durchgezogenen Risswachstumslinie (*Bild 49*, unten). In Formel {33} wird rechnerisch ein konstanter Risswachstumsexponent zu Grunde gelegt. Diese Annahme bedeutet eine lineare Extrapolation der Risswachstumskurve des gemessenen Bereichs in den Bereich niedrigerer Spannungen (und damit niedrigeren K_I -Werten). Eine solche Extrapolation ist in *Bild 49* mit der gestrichelten Paris-Geraden im unteren linken Diagramm angedeutet und führt zu einer Überbewertung der Risswachstumsgeschwindigkeit. Hierdurch werden rechnerisch zu kleine Lebensdauern ermittelt.

In *Bild 50* sind Versuche mit unterschiedlichen Spannungsrampen sowie R-Kurven der zwei Keramikarten schematisch zusammengefasst. Bei Versuchen zur Ermittlung des Risswachstumsexponenten durch Aufbringen unterschiedlicher Spannungsrampen zeigt eine ermüdende Keramik wie Aluminiumoxid einen Festigkeitsabfall in der Bruchfestigkeit bei langsamen Spannungsrampen. Hier findet unterkritisches Risswachstum während der Belastung statt. Bei Siliziumcarbid bleibt das Bruchspannungsniveau auch bei kleinen Lastanstiegsraten erhalten, die Risse wachsen während der Belastung nicht.

Bei Aluminiumoxid liegt ein ausgeprägtes R-Kurvenverhalten vor. Der Spannungsintensitätsfaktor verändert sich mit der Risslänge. Nach neuesten Veröffentlichungen unterscheidet sich auch hier das zyklische vom statischen Risswachstum [RAM11]. Für Siliziumcarbid befindet sich der Spannungsintensitätsfaktor unabhängig von der Risslänge auf gleichem Niveau. Es treten keine Verzögerungseffekte beim Risswachstum auf. Somit führt die Überschreitung des kritischen Spannungsintensitätsfaktors sofort zum Bruch.

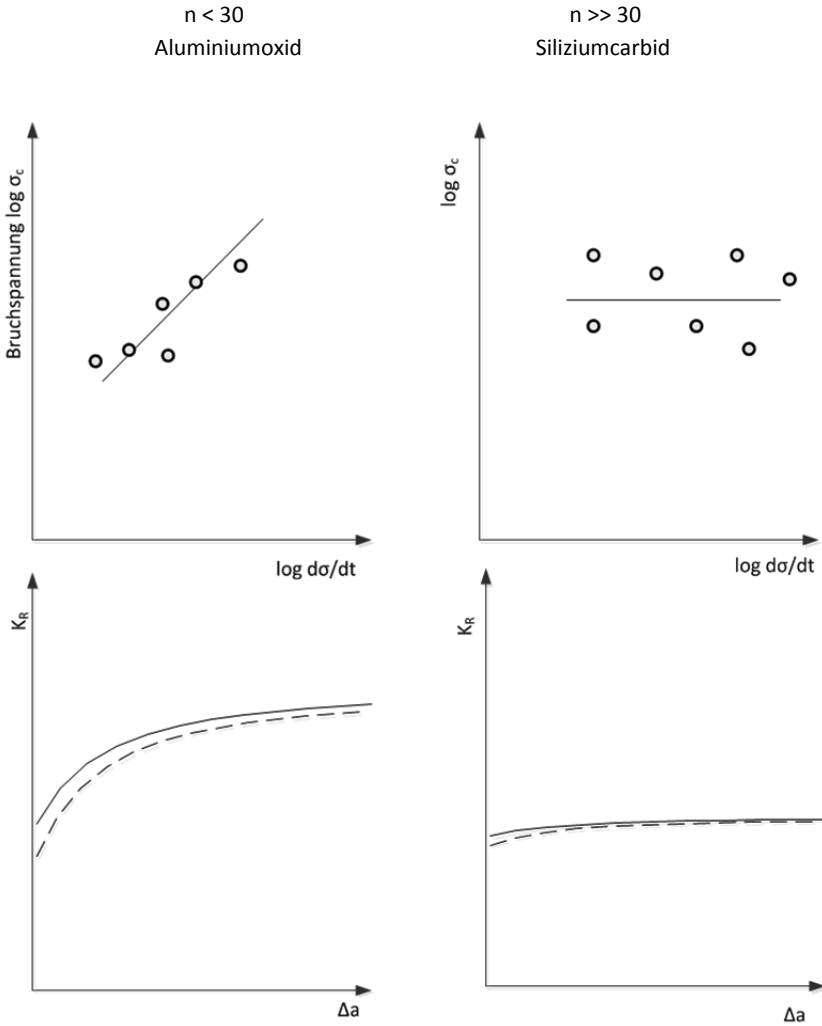


Bild 50: Bruchverhalten bei unterschiedlichen Spannungsraten und R-Kurvenverhalten für ermüdende (links) und nicht ermüdende Keramik (rechts)

3.4 Bruchbilder der verschiedenen Beanspruchungsarten

In der Bruchmechanik werden die Bruchflächen hinzugezogen, um den Bruchvorgang nachvollziehen zu können und mit Bruchvorhersagen abzugleichen. *Bild 51* zeigt exemplarisch die Bruchflächen von Aluminiumoxid und Siliziumcarbid nach Kurzzeit- sowie Dauer- versuch.

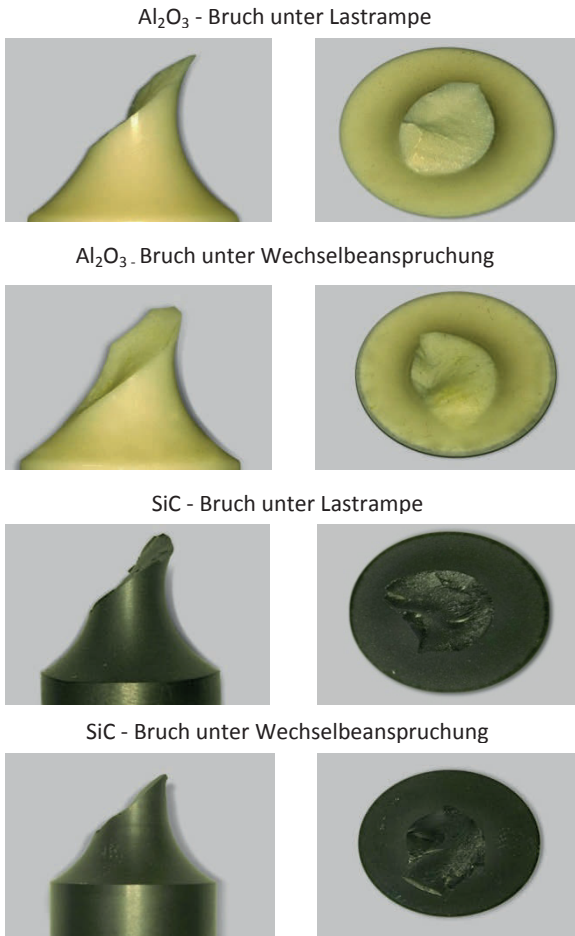


Bild 51: Bruchbilder von Al_2O_3 und SiC unter statischer und zyklischer Last

Bei näherer Betrachtung der Rissoberflächen lässt sich bei den rein unter Torsion beanspruchten Probekörpern ein Rissursprung an der Oberfläche ausmachen. Bei Al_2O_3 konnte

nur unter dem REM bei reiner Torsion ein Rissinitiierungspunkt gefunden werden (*Bild 52*), bei den SiC-Proben lässt sich der Rissursprung schon im Lichtmikroskop einfach erkennen (*Bild 53*).

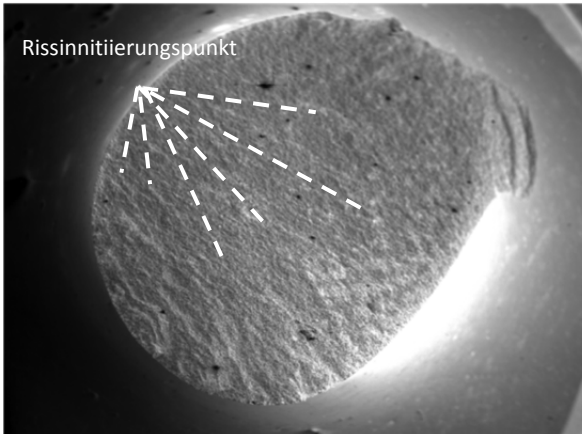


Bild 52: Bruchfläche von Al_2O_3 unter Rasterelektronenmikroskop

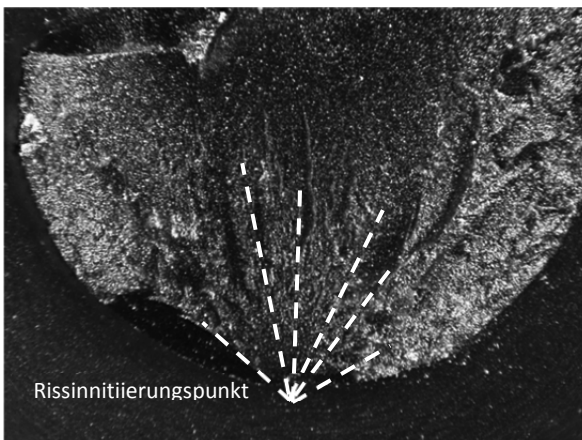


Bild 53: Bruchfläche von SiC unter Lichtmikroskop

Während sich bei reiner Torsionsbeanspruchung eine Bruchfläche mit einem Rissinitiierungspunkt ausbildet, die senkrecht zur Hauptnormalspannungsrichtung verläuft, findet man bei der kombinierten Torsions-Druck-Belastung viele kleine Rissflanken (*Bild 54*), da die Probe nach Rissinitiierung während des Bruchs stark zusammengedrückt wird.



Bild 54: Bruchflächen bei überlagertem axialem Druck

Durch das unterkritische Risswachstum im Aluminiumoxid findet der Rissfortschritt etwas langsamer statt. Es konnte durch rechtzeitiges Abschalten des Prüfstands erstmals ein Anriss erzeugt werden (*Bild 55*). Bei diesen noch vollständigen Proben (links schwellende Beanspruchung, rechts wechselnde Beanspruchung) wird deutlich, dass der Riss auch unter zusätzlicher Drucklast an der Oberfläche unter Hauptnormalspannungsrichtung (41°) startet.



Bild 55: Anriss einer Aluminiumoxidprobe nach zyklischer Torsion mit überlagertem Druck (links schwellend, rechts wechselnde Beanspruchung)

4 Entwicklung einer konstruktionsgerechten neuen Auslegungsvorschrift

Nach Zusammenstellung und Auswertung der neuesten Auslegungsroutinen für vollkeramische Strukturbauteile sowie eigenen Untersuchungen von bauteilähnlichen Probekörpern unter statischer und zyklischer Beanspruchung wird im folgenden Kapitel eine neue Auslegungsvorschrift vorgestellt. Diese eigens entwickelte Vorschrift berücksichtigt den bisherigen Stand der Technik und die im Rahmen dieser Arbeit erzielten experimentellen Ergebnisse. Sie ermöglicht dem Konstrukteur, der sich mit der Grob- und Feingestaltung der Baustruktur eines Produktes beschäftigt, eine schnellere Dimensionierung von keramischen Bauteilen durchzuführen. Ziel der hier vorgeschlagenen Vorschrift ist es, keramische Werkstoffe in Konstruktionsprozess gemäß VDI 2221 einzubeziehen. Im späteren Verlauf dieser Arbeit wird auf die Werkstoffauswahl im Konstruktionsprozess noch genauer eingegangen.

Zur Dimensionierung eines neuen Bauteils benötigt der Konstrukteur zulässige Werkstofffestigkeiten σ_{zul} , die er mit den in seinem Bauteil auftretenden Spannungen vergleicht ($\sigma_{zulässig, Bauteil} > \sigma_{vorhanden, Bauteil}$). Diese zulässige Festigkeit ist nicht nur von der Streuung des Werkstoffes abhängig, sondern zusätzlich von der Bauteilgröße und dem vorherrschenden Spannungszustand. Die von den Werkstoffherstellern ermittelte Bruchfestigkeit allein reicht für diese Dimensionierung nicht aus. Angelehnt an die FKM-Richtlinie für Anwendungen im Maschinenbau wird daher ein vereinfachtes Verfahren zur Ermittlung zulässiger Spannungen für keramische Werkstoffe entwickelt.

Die Vorschrift gliedert sich in einen statischen Festigkeitsnachweis 4.1 und einen Lebensdauernachweis 4.2. Die im Bauteil auftretenden Spannungen können von Konstrukteur sowohl analytisch nach klassischer Festigkeitslehre oder auch numerisch ermittelt werden.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Vorgehen zur Bestimmung der zulässigen Bauteilspannung ist im Ablaufplan (*Bild 56*) zusammengefasst. Eine detaillierte Auslegungsvorschrift findet sich im Anhang A2.

4.1 Dimensionieren nach statischer Festigkeit

Die vorhandenen Bauteilspannungen eines Strukturbauteils ergeben sich aus den Anforderungen an das Produkt und die Gestalt des Bauteils. Wie vorab gezeigt, versagt Keramik unter Normalspannung. Als Vergleichsspannung im Bauteil ist daher die erste Hauptnormalspannung zu wählen. Sie kann sowohl nach klassischer Festigkeitslehre analytisch als auch numerisch durch FE-Analyse ermittelt werden.

$$\sigma_{\text{vergl,Bauteil}} = \sigma_{I,\text{max,Bauteil}} \quad \{48\}.$$

Diese Vergleichsspannung $\sigma_{\text{vergl,Bauteil}}$ im Bauteil muss kleiner sein als ein zulässiger Spannungswert $\sigma_{\text{zul,Bauteil}}$, der vom Werkstoff, der Werkstoffstreuung, der Bauteilgröße, sowie dem Spannungszustand abhängig ist.

$$\sigma_{\text{vergl,Bauteil}} < \sigma_{\text{zul,Bauteil}} \quad \{49\}.$$

4.1.1 Ermittlung der zulässigen Werkstoffspannung

Die zulässige Werkstofffestigkeit kann unter Einbeziehung der Korrekturfaktoren nach der folgenden Formel abgeschätzt werden.

$$\sigma_{\text{zul,Bauteil}} = K_{D,x} \cdot K_{S,x} \cdot \sigma_{97,5\%}(m, \sigma_c) \quad \{50\}.$$

Mit $\sigma_{97,5\%}(m, \sigma_c)$ als zulässige Biegespannung bei einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 97,5%.

| | | |
|-----------|-------------------------|--|
| $K_{D,x}$ | Größeneinflussfaktor | } Mit $x = V$ bei Volumenbetrachtung und $x = S$ bei Oberflächenbetrach- . |
| $K_{S,x}$ | Spannungseinflussfaktor | |

Bei schlanken Bauteilen sollte dabei mit den Oberflächenwerten, bei voluminösen Bauteilen mit den Volumina gerechnet werden.

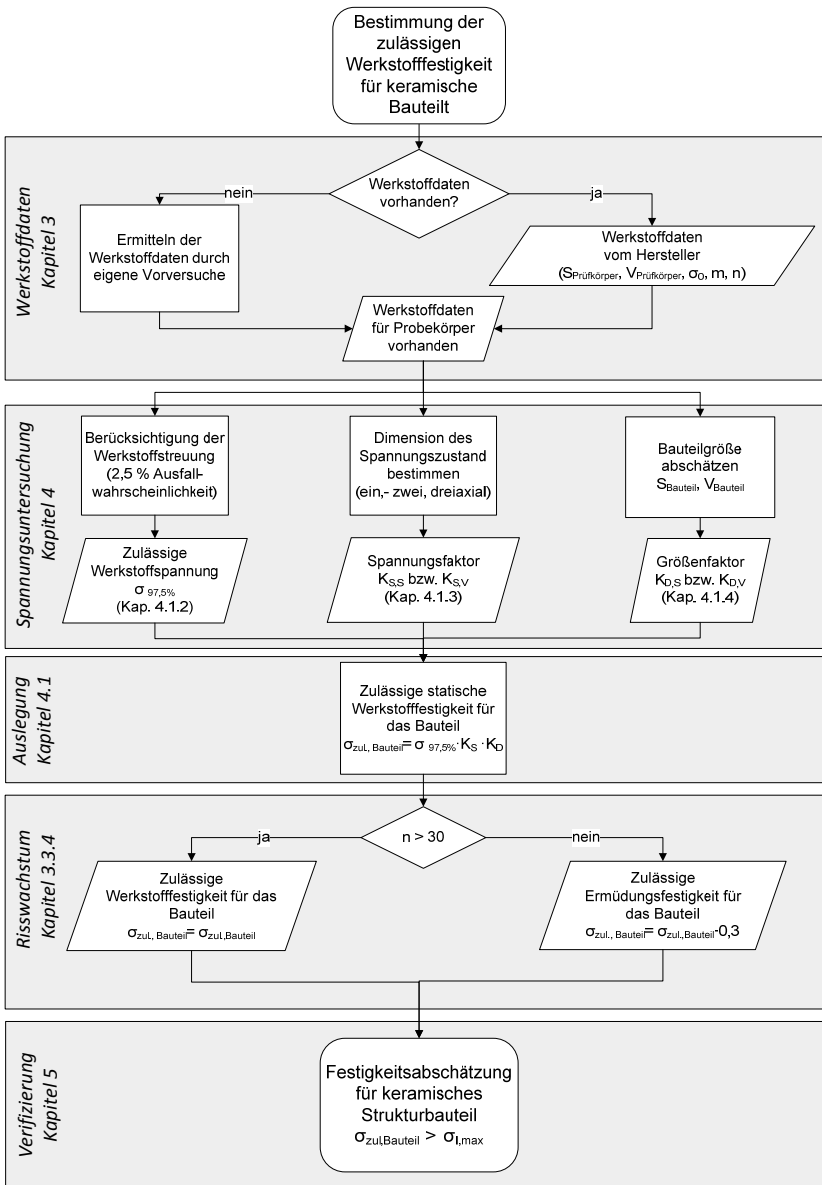


Bild 56: Ablauf der Festigkeitsauslegung für keramische Strukturbauteile

4.1.2 Zulässige Werkstoffkennwerte $\sigma_{97,5\%}(m, \sigma_c)$

Analog zur FKM-Richtlinie wird die Biegespannung $\sigma_{97,5\%}$ als zulässige Werkstoffspannung gewählt. Für einen Werkstoff mit bekannter Bruchfestigkeit σ_c und Weibullmodul m ist diese Werkstoffspannung in *Tabelle 8* angegeben.

Tabelle 8: Bruchfestigkeit von Keramik bei einer 97,5% Überlebenswahrscheinlichkeit

| | Bruchfestigkeit in MPa | | | | | | | | |
|---------|---------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 | 600 | 700 |
| Weibull | $\sigma_{97,5\%}(m, \sigma_c)$ in MPa | | | | | | | | |
| 5 | 96 | 120 | 143 | 167 | 192 | 215 | 240 | 287 | 335 |
| 10 | 137 | 172 | 207 | 242 | 277 | 311 | 346 | 415 | 484 |
| 15 | 156 | 195 | 234 | 274 | 313 | 352 | 391 | 469 | 548 |
| 20 | 166 | 208 | 249 | 291 | 333 | 374 | 416 | 499 | 582 |
| 25 | 172 | 215 | 259 | 302 | 345 | 388 | 432 | 518 | 604 |

Der Werkstoff wird erfahrungsgemäß im Bauteil durch zusätzliche Fertigungseinflüsse eine höhere Streuung aufweisen ($m_{Bauteil} < m_{Probe}$). Dieses ist bei der Wahl des Weibullmoduls zu berücksichtigen. Aus der Tabelle kann der entsprechende Richtwert entnommen werden, der für σ_{zul} eingesetzt werden kann. Eine erweiterte Tabelle findet sich in Anhang A2.

4.1.3 Berücksichtigung des mehraxialen Spannungszustands $K_{S,x}$

Als Versagenshypothese hat sich im Rahmen der Untersuchungen für mehraxiale Spannungszustände die Hauptnormalspannung erwiesen. Wie gezeigt, kann die Bewertung der Hauptnormalspannung unterschiedlich durchgeführt werden.

HNS Größte positive Hauptnormalspannung (Vernachlässigung von σ_{II} und σ_{III})

NSmR Berücksichtigung der Risslage (Integration der Hauptnormalspannungsverteilung über den Raumwinkel und Normierung über das Einheitsvolumen)

PIA Gewichtung der drei Hauptnormalspannungen über den Weibullexponenten und Bildung einer skalaren Ersatzspannung

Im Falle der einaxialen Beanspruchung sind die drei Hypothesen identisch. Die Umrechnung von einem einaxial ermittelten Prüfkennwert auf einen mehraxialen Spannungszustand führt jedoch zu unterschiedlichen Ergebnissen. Analog zur FKM-Richtlinie wird ein

Spannungseinflussfaktor $K_{S,x}$ neu eingeführt, mit dem der aus einer einaxialen Beanspruchung ermittelte zulässige Werkstoffwert auf einen mehraxialen Spannungszustand umgerechnet werden kann. In den folgenden Tabellen wird für alle drei Hypothesen bezogen auf das Einheitsvolumen der statistische Größeneinfluss in abhängig vom Weibullmodul berechnet. Es werden jeweils die effektiven Oberflächen bzw. die effektiven Volumina für verschiedene Spannungszustände untersucht. Es gilt für alle Berechnungen bei Betrachtung der Volumina gemäß {20}

$$K_{S,V} = \frac{\sigma_{mehrxial}}{\sigma_{einaxial}} = \left(\frac{V_{eff,einaxial}}{V_{eff,mehrxial}} \right)^{1/m} \quad \{51\}$$

bei Betrachtung der Oberflächen

$$K_{S,S} = \frac{\sigma_{mehrxial}}{\sigma_{einaxial}} = \left(\frac{S_{eff,einaxial}}{S_{eff,mehrxial}} \right)^{1/m} \quad \{52\}.$$

4.1.3.1 Spannungskorrekturwerte bei zweidimensionalem Spannungszustand

In *Tabelle 9* ist die zweiaxiale Zug-Beanspruchung (1 1 0), in *Tabelle 10* die zweidimensionale Zug-Druck-Beanspruchung (1 -1 0) aufgeführt. Der Einfluss des mehraxialen Spannungszustandes ist bei der *NSmR* am größten, während er bei der *HNS* überhaupt nicht berücksichtigt wird. Bei der rissorientierten Hypothese *NSmR* erhält man durch den zweidimensionalen Zugspannungszustand eine Reduzierung der zulässigen Spannung von 80% - 90%. Bei Zug-Druck-Beanspruchung erhält man eine leichte Erhöhung der zulässigen Spannung (1% - 5%). Der wesentliche Vorteil einer konstruktiv zusätzlich eingebrachten Druckspannung (zum Beispiel durch Schrumpfspannungen) ergibt sich demnach nicht aus der Art des Spannungszustands, sondern aus der Reduzierung der maximalen Hauptnormalspannung im Bauteil bei gleicher mechanischer Beanspruchung.

Für die Betrachtung der Oberflächen findet man die gleichen Verhältnisse zwischen ein- und zweiaxialen Spannungszustand. Der Unterschied besteht lediglich in dem eingesetzten Geometrieverhältnis, auf das sich der Spannungskorrekturwert bezieht.

Tabelle 9: Spannungsreduzierung bei zweidimensionalem Spannungszustand

| $1\ 0\ 0 \rightarrow$ $1\ 1\ 0$ | $K_{S,V} = K_{S,S} = \frac{\sigma_{\text{zwei axial}}}{\sigma_{\text{ein axial}}} \text{ in } \%$ | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Weibull <i>m</i> | 5 | 7 | 8 | 10 | 12 | 14 | 15 | 16 | 18 | 20 | 25 |
| HNS | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| NSmR | 76 | 80 | 82 | 84 | 86 | 87 | 88 | 88 | 89 | 90 | 92 |
| PIA | 87 | 89 | 92 | 93 | 94 | 95 | 95 | 96 | 96 | 97 | 97 |

Tabelle 10: Spannungserhöhung bei zweidimensionalem Zug-Druck-Spannungszustand

| $1\ 0\ 0 \rightarrow$ $1\ -1\ 0$ | $K_{S,V} = K_{S,S} = \frac{\sigma_{\text{Zug-Druck}}}{\sigma_{\text{ein axial}}} \text{ in } \%$ | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Weibull <i>m</i> | 5 | 7 | 8 | 10 | 12 | 14 | 15 | 16 | 18 | 20 | 25 |
| HNS | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| NSmR | 108 | 105 | 105 | 104 | 103 | 103 | 102 | 102 | 102 | 102 | 101 |
| PIA | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

4.1.3.2 Spannungskorrekturwerte bei dreidimensionalem Spannungszustand

In *Tabelle 11* ist die dreiaxiale Zug-Beanspruchung, in *Tabelle 12* eine Zug-Doppeldruckbeanspruchung berücksichtigt. Bei dreidimensionalen Spannungszuständen können nur die Volumina untersucht werden, da die Oberflächen keine 3. Spannungsrichtung aufweisen.

Tabelle 11: Spannungsreduzierung bei dreidimensionalem Zugspannungszustand

| $1\ 0\ 0 \rightarrow$ $1\ 1\ 1$ | $K_{S,V} = \frac{\sigma_{\text{dreiaxialer Zug}}}{\sigma_{\text{ein axial}}} \text{ in } \%$ | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Weibull <i>m</i> | 5 | 7 | 8 | 10 | 12 | 14 | 15 | 16 | 18 | 20 | 25 |
| HNS | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| NSmR | 62 | 68 | 70 | 74 | 76 | 79 | 80 | 80 | 82 | 83 | 85 |
| PIA | 80 | 85 | 87 | 90 | 91 | 92 | 93 | 93 | 94 | 95 | 96 |

Bei eindimensionalem Zugspannungszustand kann nach [SPei00] die Auswertung des Rissintegrals (NSmR) auch analytisch erfolgen. Es gilt für den eindimensionalen Spannungszustand das Volumenintegral

$$V_{eff} = \frac{1}{4} \int_{\Omega} \cos(\vartheta)^{2m} d\Omega = \frac{1}{2m+1} \quad \{53\}$$

während für das Volumenintegral des dreidimensional beanspruchten Bauteils

$V_{eff} = 1$ gilt. Damit folgt für den Spannungseinflussfaktor

$$K_{S,V} = \frac{\sigma_{dreiaxialer\ Zug}}{\sigma_{einaxial}} = \left(\frac{V_{eff,einaxial}}{V_{eff,dreiaxialer\ Zug}} \right)^{1/m} = \left(\frac{1}{2m+1} \right)^{1/m} \quad \{54\}.$$

Tabelle 12: Spannungserhöhung bei Zug-Doppeldruck-Beanspruchung

| $1\ 0\ 0 \rightarrow$ $1\ -1\ -1$ | $K_{S,V} = \frac{\sigma_{Zug-2Druck}}{\sigma_{einaxial}}$ in % | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Weibull m | 5 | 7 | 8 | 10 | 12 | 14 | 15 | 16 | 18 | 20 | 25 |
| HNS | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| NSmR | 116 | 111 | 109 | 107 | 106 | 105 | 105 | 105 | 104 | 104 | 103 |
| PIA | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

4.1.3.3 Wahl des Spannungskorrekturwertes

Wie die empirischen Untersuchungen gezeigt haben, geht bei den Bauteilen der Rissur sprung vor allem von der Oberfläche aus. Man findet mechanisch bedingt die größten Hauptnormalspannungen überwiegend an der Oberfläche eines Bauteils (z. B. durch Biegemomente). Folgende Punkte sind bei der Überlegung zum Spannungszustand zu berücksichtigen.

- Dreidimensionale Zugspannungszustände, bei denen alle drei Spannungen identisch groß sind, kommen in Realität nicht vor.
- Die höchsten Zugspannungen liegen meistens an der Oberfläche des Bauteils, hier sind maximal zwei Hauptspannungen zu berücksichtigen.
- Die Hauptnormalspannungen σ_I und σ_{II} weichen in der Praxis immer leicht voneinander ab, so dass durch die exponentielle Gewichtung die Hauptspannung die zweite Hauptspannung σ_{II} keinen wesentlichen Einfluss auf die Ermittlung der effektive Oberfläche haben wird. Beträgt zum Beispiel $\sigma_{II} = 90\% \cdot \sigma_I$ und der

Weibullmodul ist relativ klein mit $m = 10$ angesetzt, liegt die Abweichung bei der Ermittlung der Vergleichsspannung bei 3,0 %, bei einem Weibullmodul $m = 15$ nur noch bei 1,25%. Die Korrekturwerte werden daher unter Annahme einer vorherrschenden Mehraxialität konservativ sein.

- Wenn hohe Druckspannungen eingebracht werden, oder mehraxiale Zugspannungen im maximalen Spannungsbereich vorliegen, reduziert bzw. erhöht sich die Beanspruchung gegenüber einem einaxialen Spannungszustand. Die Korrekturwerte können aus den Tabellen abgelesen werden. Es wird die Verwendung der Normalspannungshypothese mit Riss (*NSmR*) empfohlen.

4.1.4 Berücksichtigung der Bauteilgröße $K_{D,x}$

Neben der Berücksichtigung des mehraxialen Spannungszustands muss die Bauteilgröße berücksichtigt werden. Der Einfluss der Größe auf die Festigkeit kann aus der Gleichung

$$K_{D,V} = \left(\frac{V_{Probe}}{V_{Bauteil}} \right)^{1/m} \quad \{55\}$$

bzw.

$$K_{D,S} = \left(\frac{S_{Probe}}{S_{Bauteil}} \right)^{1/m} \quad \{56\}$$

abgeschätzt werden. Dabei sollte nur das beanspruchte Volumen eingesetzt werden. Bei keramikgerechter Konstruktion wird dieses nicht wesentlich vom gesamten Bauteilvolumen abweichen. Konservative Rechnungen können mit dem gesamten Bauteilvolumen durchgeführt werden. Das numerisch berechnete effektive Volumen wird immer kleiner ausfallen als das Gesamtvolumen.

4.1.5 Festigkeitsauslegung

Beim Festigkeitsnachweis der Maschinenbaurichtlinie wird die durch einen zusätzlichen Sicherheitsabschlag reduzierte Bauteilspannung mit der zulässigen Werkstoffspannung des Bauteils verglichen. Die hier analog vorgeschlagene Vorgehensweise stellt keinen genormten Festigkeitsnachweis dar, sondern dient der Vorauslegung keramischer Bauteile. Ein zusätzlicher Sicherheitsabschlag wird in dieser Vorauslegung nicht verwendet und ist anwendungsspezifisch vom Konstrukteur festzulegen.

Zusammenfassend gilt damit

$$\sigma_{vergl,Bauteil} < \sigma_{zul,Bauteil} \quad (\text{siehe \{49\}})$$

mit dem zulässigen Werkstoffkennwert

$$\sigma_{zul,Bauteil} = K_D \cdot K_S \cdot \sigma_{97,5\%}(m, \sigma_c) \quad (\text{siehe \{50\}})$$

und der maximalen Hauptnormalspannung im Bauteil als Vergleichsspannung

$$\sigma_{vergl,Bauteil} = \sigma_{I,max,Bauteil} \quad (\text{siehe \{48\}}).$$

4.1.6 Vergleich des Größeneinflussfaktors bei Metall und Keramik

Die letzten Kapitel haben gezeigt, dass die Auslegung von metallischen und keramischen Bauteilen sich grundlegend unterscheidet. Die Ursachen liegen vor allem in der Historie begründet. Bei metallischen Bauteilen existierten die Bauteile schon, bevor eine umfassende Werkstoffmechanik entwickelt war, die Mehrzahl der keramischen Bauteile wird erst auf Grundlage der heute bekannten Werkstoffmechanik entwickelt.

Es findet sich schon zu Beginn der Entwicklung von Strukturbauteilen aus Keramik der Hinweis, dass diese sich mechanisch ähnlich verhalten wie z. B. Aluminiumguss [Bux93]. Eine Vergleichsrechnung mit der FKM-Richtlinie [FKM03] zeigt, dass keramische Werkstoffe hinsichtlich des Größeneinflusses in die Auslegungsvorschrift für metallische Werkstoffe integrierbar sind. Der Größeneinfluss von keramischen Werkstoffen mit verschiedenen Weibullexponenten wird im Rahmen dieser Arbeit erstmalig dem empirischen Größeneinfluss von Metallen gegenübergestellt [Usb09]. In *Bild 57* ist dieser Vergleich unter Annahme einer einachsigen Zugbeanspruchung als Diagramm aufgetragen. Folgende Annahmen werden dabei getroffen:

- das gesamte Volumen steht unter maximaler Zugspannung σ_I
- die Bauteile sind geometrisch ähnlich, so dass die Probenlänge einer Rundprobe ein Vielfaches x des Durchmessers beträgt ($l_{Probekörper} = x \cdot d_{Probekörper}$)
- das effektive Volumen V_{eff} berechnet sich nach der Normalspannungshypothese unter Berücksichtigung der Rissausrichtung zu

$$V_{eff} = \pi \cdot \frac{d^3}{4} \cdot x \cdot \left(\frac{1}{2m+1} \right)^{1/m}$$

- es gilt der bruchmechanische Ansatz

$$K_d = \left(\frac{V_{eff,d=40mm}}{V_{eff,d}} \right)^{1/m} = \left(\frac{(40mm)^3}{d_{Bauteil}^3} \right)^{1/m}$$

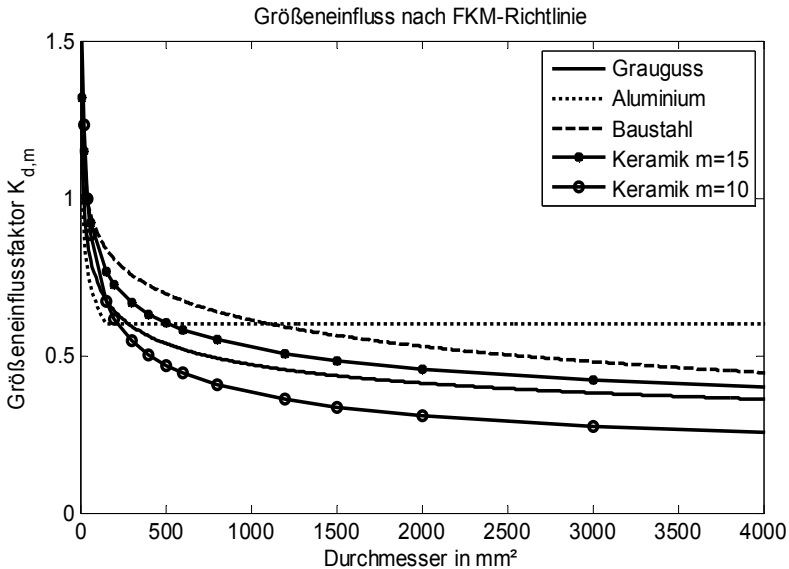


Bild 57: Vergleich des Größeneinflusses nach FKM-Richtlinie mit keramischen Bauteilen unter Volumenfehlern und Normalspannungskriterium

Es wird deutlich, dass der Größeneinfluss parallel zu den spröderen metallischen Werkstoffen, wie z. B. Gusseisen, verläuft. Die Ursachen des Größeneinflusses werden jedoch nicht klar voneinander getrennt. Ursprünglich unterscheidet man nach [Klo81] vier unterschiedliche Einflussfaktoren, dem

- technologischen Größeneinfluss (fertigungsbedingt),
- dem spannungsmechanischen Größeneinfluss,
- dem statistischen und
- dem oberflächentechnischen Größeneinfluss.

In der FKM-Richtlinie wird im „technologische Größeneinfluss“ dagegen die „mit zunehmender Bauteilabmessung im Allgemeinen abnehmende Werkstofffestigkeit“ bezeichnet, und damit ein allgemeinerer Begriff des „technologische Größeneinflusses“ verwendet.

Wie man in [Frö10] liest, wird in jüngeren Veröffentlichungen der statistische sowie spannungsmechanische Größeneinfluss als hauptsächliche Einflussgröße gesehen, so dass im Ansatz von [Son93] für metallische Werkstoffe die gleichen volumetrischen Ansätze entwickelt werden, wie sie auf Grundlage der Griffith-Theorie bei Keramik Bestand haben.

Diese Aussage korrespondiert mit einem neuen Artikel über den Größeneinfluss bei Metallen in [HER10]. Hier wird analog zur Keramik eine Weibullverteilung von Fehlstellen im metallischen Bauteil angenommen, so dass unterkritisches Risswachstum an den Fehlstellen zum Versagen führt. Als Weibullkoeffizienten werden die in *Tabelle 13* angegebenen Werte angenommen.

Tabelle 13: Weibullkoeffizienten für Metalle nach [FROE10]

| <i>Stahl</i> | <i>Stahlguss</i> | <i>Gusseisen</i> | <i>Aluminium</i> | <i>Aluminiumguss</i> |
|--------------|------------------|------------------|------------------|----------------------|
| 30 | 15 | 10 | 20 | 10 |

Auch für die Wechselfestigkeit liegt ein ähnliches Streuverhalten bei bestimmten Metallen und bei Keramiken vor. In [BUX93] wurde bei untersuchtem Si_3N_4 und Al_2O_3 jeweils eine Streuung von $m = 9,1$ ausgemacht. (“This scatter corresponds to a Weibull exponent of $m = 9.1$ and may be found also for cast aluminium alloys, nodular iron or steel welds” [Bux93])

Der wesentliche Unterschied der effektiven Volumina bzw. Oberflächen zwischen Metall und Keramik ist die zugrunde gelegte Versagenshypothese. Bei metallischen Werkstoffen wird die von-Mises-Spannung, und damit die Schubspannungen, pro Volumen-, bzw. Oberflächenelement gewichtet, bei Keramik sind es die Normalspannungen, die zum Versagen führen. Die gleiche Beanspruchung bei identischen Bauteilen kann daher bei Metallen zu anderen Volumenintegralen führen als bei keramischen Werkstoffen. Dadurch können die Größeneinflussfaktoren von Keramik und Metall bei mehraxialer Beanspruchung voneinander abweichen. Dieses ist zum Beispiel der Fall, wenn durch einen zusätzlichen Eintrag von Druckspannungen hohe Schubspannungen bei einem niedrigen Zugspannungsniveau im Bauteil auftreten. Bei uniaxialem Zug entspricht die von-Mises-Spannung jedoch der ersten Hauptnormalspannung, so dass die effektiven Volumina und damit der Größeneinfluss vergleichbar ist, wie schon in *Bild 57* gezeigt wurde.

4.2 Berücksichtigung des Langzeitverhaltens

4.2.1 Hypothesen

Es wird davon ausgegangen, dass neue Keramikwerkstoffe mit gewünschten duktilen Eigenschaften ein ähnliches Ermüdungsverhalten aufweisen wie metallische Bauteile, jedoch mit abweichender Mittelspannungsempfindlichkeit. In Kapitel 2.2 wurde der Zusammenhang zwischen Rissverzögerung und Ermüdung aufgezeigt. Die neu entwickelten Keramikwerkstoffe unterscheiden sich durch ihre Risswachstumsverzögerung grundsätzlich von einfachen monolithischen Keramiken, wie sie in den früheren Jahren untersucht wurden.

Ob ein Ermüdungsfestigkeitsnachweis geführt werden sollte, kann mit Hilfe des Risswachstumsexponenten n grob abgeschätzt werden.

- Bei sehr schnellen Rissvorgängen ($n > 30$) wird in der Anwendung kein ausgeprägtes unterkritisches Risswachstum auftreten. Die Paris-Gerade ist sehr steil, die statische Auslegung führt automatisch zu einer Dimensionierung unterhalb des $K_{I,th}$ -Wertes. Als typischer Werkstoff mit solchem Verhalten ist SiC zu nennen, wie es in vorliegender Arbeit untersucht wurde.
- Bei hohen Risswachstumsexponenten aus DIN EN 843-3 mit einer ausgeprägten Risswachstumskurve (Paris-Gesetz) ist davon auszugehen, dass unter zyklischer Beanspruchung eine Beschleunigung gegenüber statischer Ermüdung stattfindet. Eine Auslegung auf Basis der Inertfestigkeit führt bei diesen Werkstoffen zur Underdimensionierung. Während des Betriebs kann es trotz durchgeführtem Proof-Test zu unterkritischem Risswachstum führen, da dieser nur aus einer Kurzzeitbeanspruchung besteht. Ein ausgeprägtes R-Kurven-Verhalten eines keramischen Werkstoffes ist ein zusätzlicher Indikator, dass bei Erhöhung der Spannung eine Risswachstumsverzögerung eintritt. Ähnlich wie bei der Versprödung von Metallen können hier bei zyklischen Lasten Ermüdungseffekte auftreten.

Für ermüdende Materialien gibt die FKM-Richtlinie einen Quotienten zwischen der Zugfestigkeit und der Wechselfestigkeit an. Für nicht geschweißte Bauteile gilt hier eine um den Faktor $f_{w,\sigma}$ reduzierte Dauerfestigkeit für Zug-Druck-Beanspruchung $\sigma_{w,ZD}$

$$\sigma_{w,ZD} = f_{w,\sigma} \cdot R_m \quad \{56\}.$$

Der Zugdruckwechselfestigkeitsfaktor beträgt für Einsatzstahl $f_{w,\sigma} = 0,4$, für Guss und Aluminiumlegierungen $f_{w,\sigma} = 0,3$. Für keramische Werkstoffe liegt eine zu geringe Anzahl von Untersuchungen vor, um hier eine endgültige Empfehlung auszusprechen. In den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen für Aluminiumoxid erhält man einen Quotienten von $f_{w,\sigma} = 0,3$. In Übereinstimmung mit den Messungen und in Analogie zur FKM-Richtlinie wird daher vorgeschlagen, den Dauerfestigkeitswert mit einem Zugdruckwechselfestigkeitsfaktor von $f_{w,\sigma} = 0,3$ zu berechnen.

$$\sigma_{zul,Bauteil,Wechsel} = K_{D,x} \cdot K_{S,x} \cdot \sigma_{97,5\%}(m, \sigma_c) \cdot 0,3 \quad \{57\}.$$

Neben der zyklischen Ermüdung können bei Keramik statische Ermüdungsvorgänge auftreten. Risswachstum tritt jeweils dann auf, wenn der $K_{I,th}$ überschritten wird. Dieser Wert ist bei Keramik schwer bestimmbar. Bei hohen Risswachstumsexponenten (steiler v-K_I-Verlauf, wenig unterkritisches Risswachstum) liegt der Thresholdwert $K_{I,th}$ nahe am kritischen Spannungsintensitätsfaktor $K_{I,c}$, bei niedrigeren Risswachstumsexponenten ($n < 30$) liegt ein ausgeprägter Wachstumsbereich II vor, so dass der Thresholdwert weiter unterhalb des kritischen Spannungsintensitätsfaktors liegt. Die Größenordnung kann über R-Kurven sowie

Rissfortschrittskurven für den jeweiligen Werkstoff abgeschätzt werden. Unter Annahme, dass bei Unterschreiten von $K_{I,th} = 0,3 \cdot K_{I,c}$ kein messbares Risswachstum mehr auftritt, gilt für die zulässige Bauteilspannung auch hier

$$\sigma_{zul,Bauteil,Langzeit} = K_{D,x} \cdot K_{S,x} \cdot \sigma_{97,5\%}(m, \sigma_c) \cdot 0,3 \quad \{58\}.$$

4.2.2 Bewertung des Größeneinfluss

Es ist davon auszugehen, dass der Größeneinfluss auch für Ermüdungsvorgänge zu berücksichtigen ist. In den Versuchen zeigt sich jedoch, dass bei zyklischer Beanspruchung der Größeneffekt geringer ausgeprägt ist, was darauf hinweist, dass die Versagensvorgänge nicht vollständig identische Ursachen haben. Eine abschließende Bewertung hierzu kann aufgrund fehlender Datenbasis nicht gemacht werden. Es wird daher empfohlen, den Korrekturfaktor $K_{D,x}$ auch für die dauerfeste Auslegung in gleicher Größe anzuwenden.

5 Anwendungsbeispiele

An zwei Beispielen wird die vorgestellte Auslegungsroutine angewendet und mit der Ausfallwahrscheinlichkeit verglichen, die bei numerischer Berechnung mit der Hypothese $NSmR$ ermittelt wird. Es werden exemplarisch ein schlankes und ein voluminöses Bauteil unter jeweils andersartigen Spannungszuständen untersucht.

- Als schlankes Bauteil (großes Oberflächen/Bauteil-Verhältnis) wird ein Rohr unter Innendruck untersucht. Es treten reine Zugspannungen in tangentialer und axialer Richtung auf, während der Anteil der Schubspannungen vernachlässigbar klein ist.
- Als voluminöses Bauteil (kleines Oberflächen/Bauteil-Verhältnis) wird eine Welle untersucht. Als Beanspruchung wird reine Torsion angenommen, um entgegen dem ersten Beispiel einen großen Schubspannungsanteil im Bauteil zu erzeugen.

5.1 Rohr mit Innendruck

Es wird ein dünnwandiges Rohr unter Innendruck gewählt (*Bild 58*). Solche Rohre sind gängige keramische Bauteile und werden üblicherweise extrudiert. Das FE-Modell besteht aus einem schmalen Ring, der sowohl mit Innendruck, als auch mit axialem Zug beansprucht wird. Die Zugspannung wird aus dem bei geschlossenem Rohr stirnflächig anliegenden Druck bestimmt. Wie aus der sogenannten „Kesselformel“ bekannt, entsteht bei Druckbeaufschlagung in dünnwandigen Rohren ein zweidimensionaler Spannungszustand in tangentialer sowie axialer Richtung, bei der die tangentielle (Zug-)Spannung doppelt so hoch ist wie die axiale Zugspannung. Die radialen Spannungen sind im Vergleich dazu vernachlässigbar, so dass die erste Hauptnormalspannung dominant ist und in Umfangrichtung verläuft und global ein zweidimensionaler Spannungszustand vorliegt.

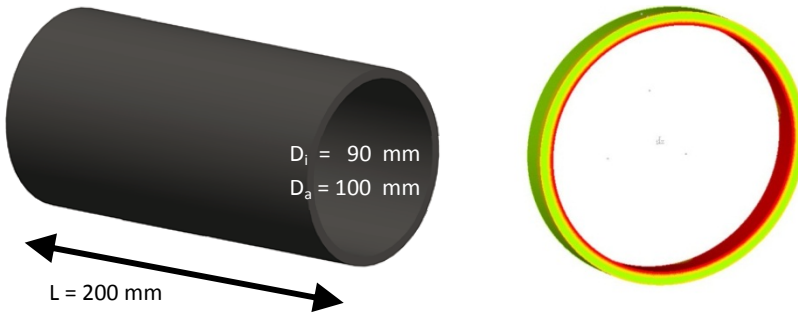


Bild 58: SIC-Rohr unter Innendruck, Rohrgeometrie (links) und FE-Modell (σ_i) (rechts)

Für die Vergleichsrechnung wurde ein Außendurchmesser von $D_a = 100 \text{ mm}$, ein Innendurchmesser von $D_i = 90 \text{ mm}$ und eine Länge von $L = 200 \text{ mm}$ gewählt.

Werkstoffkennwerte

Siliziumcarbid mit Herstellerangabe $\sigma_c = 400 \text{ MPa}$ und $m = 10$ (4Pkt.-Biegung) und einem angenommenen unterkritischen Risswachstum nach [Usb10] von $n \gg 30$.

5.1.1 Rohrfestigkeit nach neuer Auslegungsvorschrift

Analytische Volumenbetrachtung

Die Werkstofffestigkeit mit einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 97,5% wird aus *Tabelle 8*, S. 82 entnommen (bzw. Anhang A2, Abschnitt 2.3).

$$\sigma_{97,5\%}(m = 10, \sigma_c = 400 \text{ MPa}) = 277 \text{ MPa}$$

Die Hauptspannungen im Rohr sind die Tangential- und Axialspannungen. Man erhält einen Festigkeitsabschlag für mehraxiale Beanspruchung aus *Tabelle 9*, S. 94 (bzw. Anhang A2, Abschnitt 2.3) mit

$$K_{S,V} = 0,84$$

und einen Festigkeitsabschlag für den Größeneinfluss von

$$K_{D,V} = \left(\frac{V_{\text{Probe}}}{V_{\text{Bauteil}}} \right)^{1/m} = 0,490$$

Mit dem Probenvolumen aus dem Vierpunkt-Biegeversuch von $V_{\text{Probe}} = 240 \text{ mm}^3$ (s. Anhang A2) und dem Zylindervolumen $V_{\text{Bauteil}} = \frac{\pi}{4}(D_a^2 - D_i^2) \cdot L = 298 \text{ 000 mm}^3$.

Damit erhält man eine zulässige Auslegungsspannung für das Bauteil von

$$\sigma_{zul,Bauteil} = K_{D,V} \cdot K_{S,V} \cdot \sigma_{97,5\%}(m, \sigma_c) = 114 \text{ MPa}$$

Analytische Oberflächenbetrachtung

Die Werkstofffestigkeit mit einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 97,5% wird wieder aus *Tabelle 8* entnommen.

$$\sigma_{97,5\%}(m = 10, \sigma_c = 400 \text{ MPa}) = 277 \text{ MPa}$$

Die Hauptspannungen im Rohr sind die Tangential- und Axialspannungen. Man erhält einen Festigkeitsabschlag für mehraxiale Beanspruchung aus *Tabelle 9* mit

$$K_{S,S} = 0,84$$

und einen Festigkeitsabschlag für den Größeneinfluss von

$$K_{D,S} = \left(\frac{S_{Probe}}{S_{Bauteil}} \right)^{1/m} = 0,516$$

Mit der unter Zug stehenden Probenoberfläche aus dem Vierpunkt-Biegeversuch von $S_{Probe} = 4 \cdot 40 \text{ mm}^2 = 160 \text{ mm}^2$ (s. Anhang A2) und den Zylinderoberflächen $S_{Bauteil} = \pi \cdot (D_a + D_i) \cdot L = 119\,000 \text{ mm}^2$.

Damit erhält man eine zulässige Auslegungsspannung für das Bauteil von

$$\sigma_{zul,Bauteil} = K_{D,S} \cdot K_{S,S} \cdot \sigma_{97,5\%}(m, \sigma_c) = 120 \text{ MPa}$$

5.1.2 Numerische Ausfallwahrscheinlichkeit des Rohrs

Für das in 5.1.1 dimensionierte Rohr wird in vorliegendem Kapitel nach dem üblichen FEM-Verfahren (z. B. Programm STAU) unter Berücksichtigung der Risshypothese (NSmR) eine numerische Ausfallwahrscheinlichkeit bestimmt.

Numerische Volumenbetrachtung

Die numerische Ausfallwahrscheinlichkeit berechnet sich nach dem effektiven Volumina des Bauteils und dem effektiven Volumen der 4-Pkt-Biegeprobe. Gerechnet wird mit Integration über den Riss (NSmR). Für die Probe erhält man $V_{eff,Probe} = 0,567 \text{ mm}^3$. Für das Rohr erhält man $V_{eff,Rohr} = 12014 \text{ mm}^3$.

Die numerisch nach NSmR berechnete Ausfallwahrscheinlichkeit beträgt für die nach Festigkeitsnachweis nach Kapitel 4.1 ermittelte zulässige Spannung $\sigma_{zul,Bauteil,V} = 114 \text{ MPa}$

$$P_A(m = 10, V_{eff} = 12014 \text{ mm}^3, \sigma_c = 400 \text{ MPa}, \sigma = 114,1 \text{ MPa}) = 0,073.$$

Numerische Oberflächenbetrachtung

Die numerische Ausfallwahrscheinlichkeit berechnet sich nach der effektiven Oberfläche des Bauteils und der effektiven Oberfläche der 4-Pkt-Biegeprobe. Gerechnet wird mit Integration über den Riss (*NSmR*). Für die Probe erhält man $S_{eff,Probe} = 15,4 \text{ mm}^2$. Für das Rohr erhält man $S_{eff,Rohr} = 4145 \text{ mm}^2$.

Die numerisch nach *NSmR* berechnete Ausfallwahrscheinlichkeit beträgt für die nach Festigkeitsnachweis Kap. 6.1 ermittelte zulässige $\sigma_{zul,Bauteil,S} = 120,0 \text{ MPa}$

$$P_A(m = 10, S_{eff} = 4145 \text{ mm}^2, \sigma_c = 400 \text{ MPa}, \sigma = 120 \text{ MPa}) = 0,0016$$

5.1.3 Zeitfeste Auslegung des Rohrs

Festigkeitsabschätzung bei Dauerbetrieb

Auf Grund des geringen unterkritischen Risswachstums $n \gg 30$ bei SiC gilt das statisch ausgelegte Bauteil als dauerhaft.

$$\sigma_{zul,Bauteil,Dauer} = \sigma_{zul,Bauteil} = 114 \text{ MPa}$$

Lebensdauerberechnung nach Risswachstumshypothese

Die statische Lebensdauer wird theoretisch über das unterkritische Risswachstum bestimmt. Es gilt für die Ausfallzeit nach {39}

$$t_f = B \sigma_c^{n-2} \sigma_f^{-n}$$

Zur Verifizierung der vorgeschlagenen Festigkeitsauslegung werden für SiC nach [Usb10] $B = 5,76$ angenommen. Zusätzlich wird exemplarisch $n = 30$ angenommen, also die Entscheidungsgrenze, bei der nach entwickelter Auslegungsvorschrift keine weitere Dauerfestigkeitsbetrachtung notwendig ist. Es ergibt sich für die ermittelte Auslegungsspannung von $\sigma_f = 114 \text{ MPa}$ eine Lebensdauer von $t_f = 5,3 \cdot 10^{19}$, d.h., 600 Billion Jahre.

5.1.4 Vergleich der Ausfallwahrscheinlichkeiten

In *Bild 59* ist die Ausfallwahrscheinlichkeit für Volumenfehler und Oberflächenfehler gegenüber der ursprünglichen Verteilung aufgetragen. Zusätzlich sind die nach Kapitel 4.1 ermittelten zulässigen Bauteilspannungen $\sigma_{zul,Fläche}$ und $\sigma_{zul,Volumen}$ in das Diagramm eingetragen. Während unter Annahme von Volumenfehlern die Vergleichsspannung mit der numerischen Berechnung fast übereinstimmt, erhält man bei Annahme von Oberflächenfehlern nach dem neuen Verfahren einen konservativen Vergleichsspannungswert. Sowohl bei Betrachtung der Oberfläche als auch bei Betrachtung des Volumens liegt die zulässige Spannung der manuellen Auslegung zwischen den Spannungen, die bei numerischer Betrachtung für Oberfläche und Volumen bei einer Ausfallwahrscheinlichkeit von 2,5 % errechnet werden. Die Vergleichsspannungen liegen mit $\sigma_{zul,Bauteil,S} = 120,0 \text{ MPa}$ und

$\sigma_{zul, Bauteil, V} = 114 \text{ MPa}$ weit unter der kritischen Biegefestigkeit $\sigma_c = 400 \text{ MPa}$, die in der Größe des Bauteils und die relativ hohe Streuung des Werkstoffs ($m=10$) begründet sind. Durch die neue Auslegungsvorschrift kann diese Festigkeitsreduzierung relativ schnell ermittelt werden.

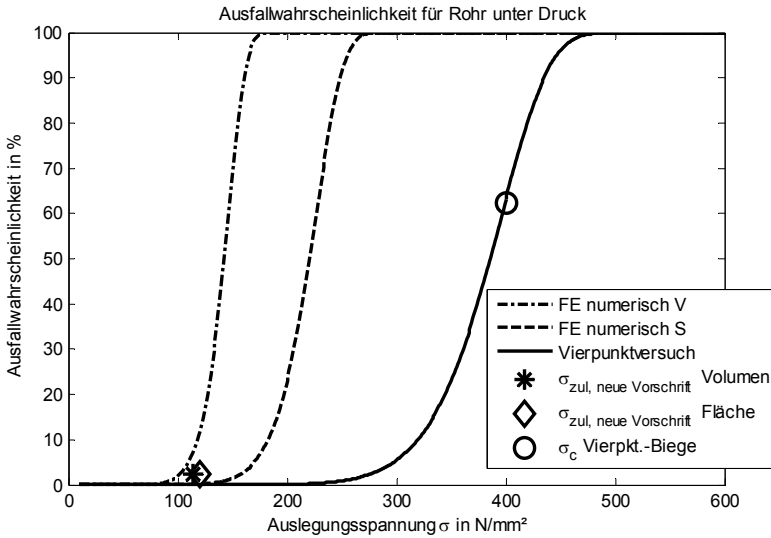


Bild 59: Ausfallwahrscheinlichkeit numerisch und Auslegungsspannung nach Kap 4.3

5.1.5 Vergleich der Lebensdauerprognose

Für hohe Risswachstumsexponenten $n > 30$ erhält man rechnerisch sehr hohe Standzeiten. Wie in Kapitel 4.2 gezeigt, liegt hier kein ausgeprägtes Risswachstum vor. Die Keramik bricht sofort bei Überschreiten der Bruchspannung. Wird das Bauteil statisch richtig ausgelegt, ist keine zusätzliche Ermüdungsbetrachtung notwendig. Rechnerisch führt ein hoher Risswachstumsexponent n zu extrem hohen Lebensdauern. Empirisch kann davon ausgegangen werden, dass bei Unterschreiten einer statisch ermittelten Auslegungsspannung, die weit unterhalb der Bruchspannung liegt, $\sigma_{zul, Bauteil} \ll \sigma_c$ (siehe Bild 59), kein messbares Risswachstum auftritt. Eine zusätzliche Lebensdauerbetrachtung bei keramischen Bauteilen für Werkstoffe mit $n > 30$ ist damit nicht notwendig. Das Ergebnis verifiziert die in Kapitel 4 entwickelte Vorgehensweise bei der Dimensionierung keramischer Strukturbauteile.

5.2 Welle unter Torsion

Die Welle unter Torsion stellt eine reine Schubspannungsbeanspruchung dar. Das Oberflächen/Volumen-Verhältnis ist wesentlich geringer als beim Rohr, so dass es entgegen dem ersten Beispiel als „voluminös“ bezeichnet werden kann. Für die Vergleichsrechnung wurde ein Wellendurchmesser von $D_a = 25 \text{ mm}$ gewählt. Die Welle hat eine Länge von $L = 200 \text{ mm}$ (siehe Bild 60).

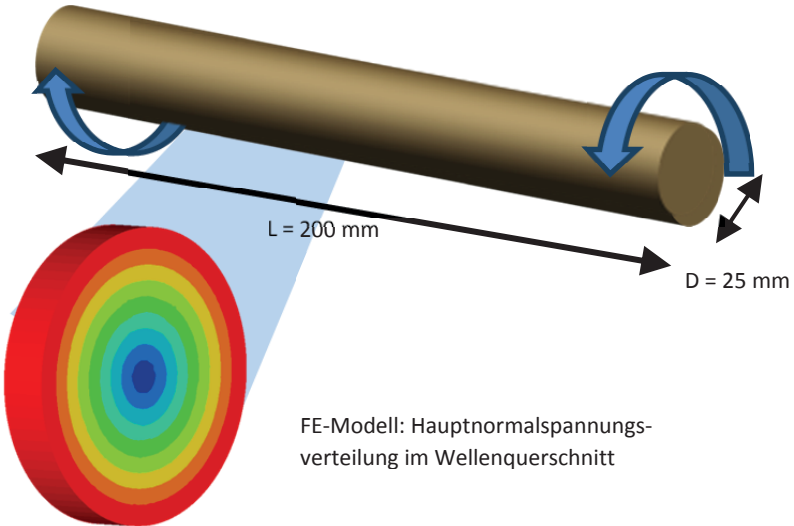


Bild 60: Welle aus ZrO_2 unter Torsionsbeanspruchung

Werkstoffkennwerte

Teilstabilisiertes Zirkondioxid mit Aluminiumoxid und der Herstellerangabe $\sigma_c = 500 \text{ MPa}$ und $m = 15$ aus 4Pkt.-Biegeversuch. Für das unterkritischen Risswachstum wird nach [FET00] $n = 40,7$ (90% – Intervall: [29,6; 64,4]) sowie $\log_{10}(B\sigma_c^{n-2}) = 118,5$ angenommen.

5.2.1 Statische Wellenfestigkeit nach Auslegungsvorschrift

Die Werkstofffestigkeit mit einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 97,5% kann aus *Tabelle 8* entnommen werden.

$$\sigma_{97,5\%}(m = 15, \sigma_c = 500 \text{ MPa}) = 391 \text{ MPa}$$

Die Hauptspannung der Welle auf Torsion verläuft unter 45° . Unter 135° verläuft die zweite Hauptspannung in gleicher Größe mit umgekehrtem Vorzeichen. Damit herrscht an der Oberfläche in Zug-Druck-Zustand. Die dritte Hauptspannungsrichtung in radialer Richtung ist vernachlässigbar.

Auslegung nach Bauteilvolumen

Man erhält einen kleinen Festigkeitszuschlag für mehraxiale Beanspruchung aus *Tabelle 10* mit

$$K_{S,V} = 1,02$$

und einen Festigkeitsabschlag für den Größeneinfluss von

$$K_{D,V} = \left(\frac{V_{\text{Probe}}}{V_{\text{Bauteil}}} \right)^{1/m} = 0,670$$

Damit erhält man eine zulässige Auslegungsspannung für das Bauteil von

$$\sigma_{\text{zul,Bauteil},V} = K_{D,V} \cdot K_{S,V} \cdot \sigma_{97,5\%}(m, \sigma_c) = 267 \text{ MPa}$$

Auslegung nach Bauteiloberfläche

Die Hauptspannungen an der Oberfläche sind in Zug-Druck-Richtung unter 45° zur axialen Richtung. Man erhält einen Festigkeitszuschlag für mehraxiale Beanspruchung aus *Tabelle 10* von

$$K_{S,S} = 1,02$$

und einen Festigkeitsabschlag für den Größeneinfluss von

$$K_{D,S} = \left(\frac{S_{\text{Probe}}}{S_{\text{Bauteil}}} \right)^{1/m} = 0,737.$$

Damit erhält man eine zulässige Auslegungsspannung für das Bauteil von

$$\sigma_{\text{zul,Bauteil},S} = K_{D,S} \cdot K_{S,S} \cdot \sigma_{97,5\%}(m, \sigma_c) = 293 \text{ MPa}.$$

5.2.2 Numerische Ausfallwahrscheinlichkeit der Welle

Numerische Ausfallwahrscheinlichkeit des Bauteilvolumens

Die numerische Ausfallwahrscheinlichkeit berechnet sich nach dem effektiven Volumen des Bauteils und dem effektiven Volumen der 4-Pkt-Biegeprobe. Gerechnet wird mit Integration über den Riss (NSmR). Für die Probe ergibt sich ein effektives Volumen von $V_{eff,Probe} = 0,257 \text{ mm}^3$. Für die Welle erhält man nach FE-Analyse und Auswertung des vorhandenen Spannungsverlaufs $V_{eff,Welle} = 395 \text{ mm}^3$.

Die numerisch nach NSmR berechnete Ausfallwahrscheinlichkeit beträgt für die nach statischem Festigkeitsnachweis Kap. 4.1 ermittelten, zulässigen Bauteilspannung $\sigma_{zul,Bauteil,V} = 267 \text{ MPa}$

$$P_A(m = 15, V_{eff} = 395 \text{ mm}^3, \sigma_c = 500 \text{ MPa}, \sigma = 267 \text{ MPa}) = 0,118.$$

Numerische Ausfallwahrscheinlichkeit der Wellenoberfläche

Die numerische Ausfallwahrscheinlichkeit berechnet sich nach der effektiven Oberfläche des Bauteils und der effektiven Oberfläche der 4-Pkt-Biegeprobe. Gerechnet wird mit Integration über den Riss (NSmR). Für die Probe erhält man $S_{eff,Probe} = 12,2 \text{ mm}^2$. Für die Welle erhält man $S_{eff,Welle} = 334 \text{ mm}^2$.

Die numerisch nach NSmR berechnete Ausfallwahrscheinlichkeit beträgt für die nach statischem Festigkeitsnachweis Kap. 4.1 ermittelte zulässige Bauteilspannung $\sigma_{zul,Bauteil,S} = 293 \text{ MPa}$.

$$P_A(m = 15, S_{eff} = 334 \text{ mm}^2, \sigma_c = 500 \text{ MPa}, \sigma = 293 \text{ MPa}) = 0,0089.$$

5.2.3 Zeitfeste Auslegung der Welle

Dauerfestigkeitsabschätzung unter Wechsellast

Da die Welle wechselnd beansprucht wird und ein ausgeprägtes Risswachstum vorliegt, wird eine reduzierte Dauerfestigkeit ermittelt. Bei Betrachtung der Volumina erhält man

$$\sigma_{zul,Bauteil,Wechsel} = K_{D,V} \cdot K_{S,V} \cdot \sigma_{97,5\%}(m, \sigma_c) \cdot 0,3 = 80 \text{ MPa}$$

unter Betrachtung der Oberflächen ergibt sich

$$\sigma_{zul,Bauteil,Wechsel} = K_{D,S} \cdot K_{S,S} \cdot \sigma_{97,5\%}(m, \sigma_c) \cdot 0,3 = 88 \text{ MPa}$$

Bruchmechanische Lebensdauerabschätzung unter Wechselbeanspruchung

Unter Annahme der bruchmechanischen Ansätze Kap 3.2.4 gilt für die zyklisch beanspruchte Welle eine Lebensdauer von {40}

$$t_{fc} = t_f \left(\frac{\sigma}{\sigma_a} \right)^n B \frac{1}{h \left(n, \frac{\sigma_m}{\sigma_a} \right)}$$

mit

$$h(n, 0) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \frac{\Gamma \left(\frac{n}{2} + \frac{1}{2} \right)}{\Gamma \left(\frac{n}{2} + 1 \right)}.$$

Es ergibt sich für die berechnete Auslegungsspannung (hier: Flächenbetrachtung) von $\sigma_a = \sigma_{zul, Bauteil, Wechsel} = 88 \text{ MPa}$ unter zyklischer Beanspruchung mit einer Mittelspannung $\sigma_m = 0 \text{ MPa}$ eine rechnerische Lebensdauer $t_f = 1,80 \cdot 10^{84} \text{ h}$. Unter Berücksichtigung der Streuung des Risswachstumsexponenten $n_{90\% \text{-Intervall}} = [29,6; 64,4]$ erhält man einen Lebensdauerbereich $t_{f90\%} = [6,9 \cdot 10^{-10} \text{ sec}; 2,31 \cdot 10^{124} \text{ h}]$. Die Unsicherheit bei der Annahme des Risswachstumsexponenten führt bei der analytischen Extrapolation zu keinen aussagekräftigen Werten, da sowohl sofortiger Bruch, als auch Standzeiten von Mio. Jahren innerhalb des errechneten Konfidenzintervalles der Lebensdauer liegen.

5.2.4 Vergleich der Berechnungsmethoden (tordierte Welle)

Statische Betrachtung

Im *Bild 61* ist die Ausfallwahrscheinlichkeit für Volumenfehler und Oberflächenfehler gegenüber der ursprünglichen Verteilung aufgetragen. Zusätzlich sind die nach Kapitel 4.1 empfohlenen Vergleichsspannungen in das Diagramm eingetragen. Während unter Annahme von Volumenfehlern die Vergleichsspannung mit der numerischen Berechnung fast übereinstimmt, erhält man bei Annahme von Oberflächenfehlern nach dem neuen Verfahren einen konservativen Vergleichsspannungswert. Sowohl bei Betrachtung der Oberflächen, als auch bei Betrachtung des Volumens liegt die zulässige Spannung der manuellen Auslegung zwischen den Spannungen, die bei numerischer Betrachtung für Oberfläche und Volumen bei einer Ausfallwahrscheinlichkeit von 2,5 % errechnet werden. Die Vergleichsspannungen liegen mit $\sigma_{zul, Bauteil, S} = 293 \text{ MPa}$ und $\sigma_{zul, Bauteil, V} = 267 \text{ MPa}$ etwa bei der Hälfte der kritischen Beigefestigkeit $\sigma_c = 500 \text{ MPa}$. In *Bild 61* wird deutlich, dass die zulässigen Festigkeiten der Auslegungsrechnung zwischen der numerischen Ausfallwahrscheinlichkeit für Oberflächen- und Volumenfehlern liegen.

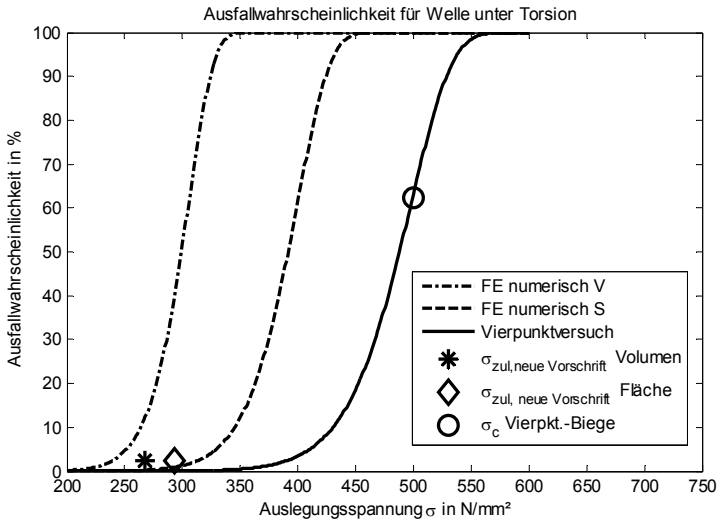


Bild 61: Auslegungsspannungen für Welle unter Torsionsbeanspruchung

Vergleich der Lebensdauerberechnung

Durch die Unsicherheiten bei der Bestimmung des Risswachstumsexponenten erhält man bei der Lebensdauerbetrachtung einen großen Zeitbereich für das Versagen. Bei dem exemplarisch gewählten Beispiel liegt die Zeit zwischen mehreren Sekunden und vielen Mio. Jahren. Dieses zeigt die Grenzen der Lebensdauerberechnung durch Extrapolation eines logarithmischen Zusammenhangs auf, der nur in sehr eingeschränktem Geltungsbereich anzuwenden ist (innerhalb der geltenden Paris-Geraden). Die Reduzierung des Spannungsniveaus analog der spröden metallischen Werkstoffe gemäß FKM-Richtlinie um Faktor 0,3 der zulässigen statischen Werkstoffspannung liefert dagegen einen anwendbaren und in dieser Arbeit empirisch bestätigten Wert für Zyklenzahlen $N = 10^6 \dots 10^7$.

5.3 Verifizierung der Auslegungsregeln

Die unter 5.1 und 5.2 berechneten Bauteile zeigen, dass die zulässige Werkstoffspannung gut über die Auslegungsregel abgeschätzt werden kann. Die errechneten Werkstoffspannungen liegen bei beiden Beispielen im Bereich zwischen der numerischen Oberflächen- und Volumenbetrachtung für eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 2,5 %. In den Diagrammen wird außerdem sichtbar, dass sowohl bei der statischen, als auch bei der zeitlichen Betrachtung eine Extrapolation auf große Bauteile, lange Standzeiten und niedrige Ausfallwahrscheinlichkeiten stattfindet, die bisher nicht über empirische Daten abgesichert wer-

den können. Eine umfangreiche numerische Auslegung auf Basis der Annahmen für die Extrapolation wird die gleichen Unsicherheiten aufweisen, wie die in dieser Arbeit entwickelten Auslegungsvorschriften. Ein Konstrukteur kann mit Hilfe der hier vorgeschlagenen Auslegungsvorschrift relativ einfach zulässige Werkstofffestigkeiten ermittelt, um in der Konzeptions- und Entwurfsphase Bauteilvarianten aus Keramik entwerfen und bewerten zu können. Die neu entwickelte Auslegungsvorschrift ist somit eine Ergänzung und Vereinfachung der bisherigen numerischen Bauteilbetrachtung, bei der erst nach Vorliegen eines ausgearbeiteten 3D-Entwurfs die Ausfallwahrscheinlichkeit bestimmt werden kann.

6 Innovative Produktentwicklung mit keramischen Werkstoffen

6.1 Anforderungen für den Einsatz von keramischen Werkstoffen

Aus der Historie wird deutlich, dass sich der Einsatz von keramischen Bauteilen vor allem aus Kostengründen nur in den Bereichen durchsetzt, in denen andere Werkstoffe nicht mehr einsetzbar sind. Die Entscheidung, keramische Werkstoffe zu verwenden, wird selten im Rahmen einer Neukonstruktion, sondern meistens im Rahmen einer Anpassungskonstruktion getroffen. Aufgrund des spezifischen Werkstoffwissens treten oft Schwierigkeiten in der konstruktiven Umsetzung einer solchen Entscheidung auf. In diesem abschließenden Kapitel wird auf keramische Lösungsvarianten im Konstruktionsprozess näher eingegangen.

6.1.1 Keramik in der systematischen Materialauswahl

Die Hochleistungskeramiken bilden nur ein kleines Segment eines großen Werkstoffportfolios, aus dem der Konstrukteur den Werkstoff während des Konstruktionsprozesses auswählt. Die Werkstoffvielfalt hat dabei in den letzten Jahrzehnten erheblich zugenommen. Die Werkstoffauswahl des Konstrukteurs basiert meistens auf Erfahrungswissen, das sich auf die bisher von ihm verwendeten Materialien beschränkt. Um das gesamte Werkstoffpotential in der Entwicklung neuer Produkte einzubeziehen, werden Methoden entwickelt, um geeignete Werkstoffe systematisch auszuwählen. Die vorgestellte methodische Vorgehensweise soll bei der Werkstoffauswahl dazu beitragen, Keramik als potenziellen Werkstoff in den Konstruktionsprozess leichter und besser einzubeziehen.

Werkstoffauswahl mit Werkstoffindizes

Man unterscheidet bei Materialien quantitative, qualitative und attributive Eigenschaften. Eine der am weitesten verbreiteten Methode ist die Gegenüberstellung quantitativer Materialeigenschaften in Werkstoffdiagrammen [ASH11], [COL03], [MOE08]. Keramik weist in diesen Diagrammen oft eine überdurchschnittliche Eignung auf, da ein hohes E-Modul mit einer geringen Dichte, einer hohen Biegefestigkeit und einer niedrigen Temperatureaus-

dehnung generell konstruktive Vorteile bringt. Über dieses methodische Auswahlverfahren werden keramische Werkstoffe als geeignete Werkstoffgruppe ausgewiesen, wenn hohe Steifigkeiten oder hohe Festigkeiten kombiniert mit geringem Gewicht gefordert werden („light weight design“). Aus einem Werkstoffdiagramm, wie Bild 62 zeigt, lässt sich ableiten, dass Keramik zum Beispiel als Werkstoff für Leichtbau gut geeignet ist.

Aus der vorliegenden Arbeit wird dagegen deutlich, dass der Vergleich einer keramischen Biegefestigkeit nach Weibull-Verteilung nicht mit den durch Mittelwert bestimmten metallischen Zugfestigkeiten gleichzusetzen ist. Auch Ashby als Hauptverfasser der Materialindizes schließt in oben angeführtem Beispiel Keramik als Werkstoff abweichend von seiner eigenen Methode über zusätzliche Restriktionen aus. „The best choice are unexpected ones ... some ceramics, but these are ruled out by their low toughness“ [Ash11].

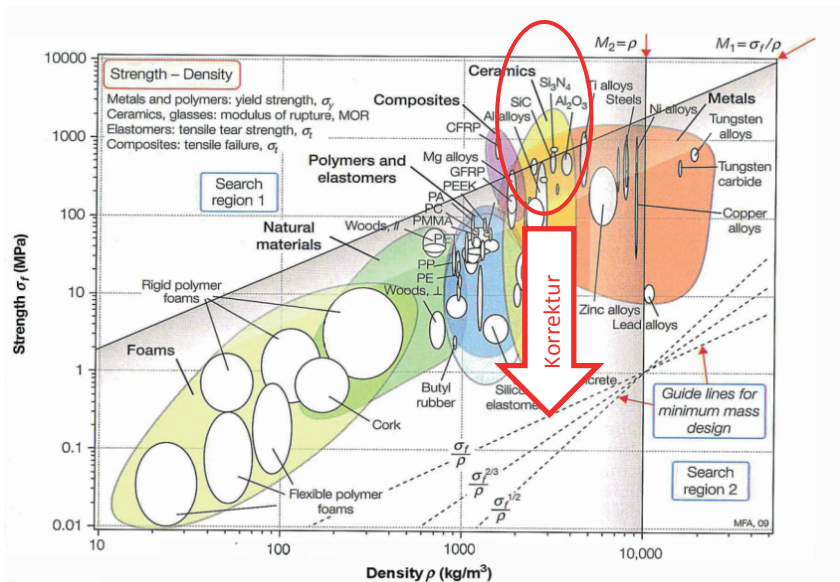


Bild 62: Festigkeits-Dichte-Diagramm nach [Ash11]

Andere Veröffentlichungen aus dem Bereich Leichtbau stoßen auf dieselben Schwierigkeiten bei der Anwendung der Methode. Keramik scheint bei der Werkstoffermittlung mit Hilfe der Werkstoffindizes als geeignet. Einschränkend wird in [Wei11] darauf hingewiesen, dass ein einfaches Kriterium oft nicht ausreicht. Es werden zusätzliche Kriterien und ein zusätzlicher Formfaktor in die Methode eingeführt. Trotz dieser Korrekturen wird Keramik weiterhin als geeigneter Werkstoff für Leichtbau ausgewiesen, obwohl die Festigkeitsanforderungen in der Praxis in der Regel nicht erfüllt werden können.

Zusammenfassend können die Materialindizes als geeignetes Werkzeug betrachtet werden, keramische Werkstoffe in die Produktentwicklung des Maschinenbaus zu etablieren. Um keine „unerwarteten Ergebnisse“ zu erhalten, wie sie von Ashby selbst angemerkt werden, sollte die Aussagekraft der Materialauswahldiagramme für keramische Werkstoffe zukünftig verbessert werden. Es ist eine Korrektur der Festigkeitskennwerte notwendig¹, in der die Materialstreuung, die bisher nachgeschaltetes Ausschlusskriterium ist, mit abgebildet wird. Abgeleitet aus dem Vorgehen in Kapitel 4 wird hier daher vorgeschlagen, statt der Biegefestigkeit σ_c (62,3%-Ausfallwahrscheinlichkeit) den Festigkeitswert für 2,5% Ausfallwahrscheinlichkeit anzugeben. Die Werkstoffgruppe der technischen Keramik wird dann im Festigkeits-Dichte-Diagramm weiter unten angeordnet sein und vorwiegend unterhalb der Auswahlgeraden für eine Leichtbauauswahl liegen, wie in *Bild 62* angedeutet wird.

Werkstoffauswahl mit Hilfe eines Fragekatalogs

Alternativ zum quantitativen Vergleich einzelner Werkstoffparameter lassen sich über Fragekataloge die Materialanforderungen eines Produktes qualitativ und attributiv bestimmen. Ein solcher Fragekatalog ist in *Tabelle 14* gezeigt und für Produkte mit Keramikbauteilen exemplarisch beantwortet.

Tabelle 14: Identifizierung von Produktanforderungen, angelehnt an [Col03]

| | | |
|----|--|------|
| 1 | Wird durch ein notwendiges kleines Bauteilvolumen eine hohe Festigkeit notwendig? | nein |
| 2 | Ist hohe Festigkeit bei niedrigem Gewicht gefordert? | nein |
| 3 | Ist Festigkeit bei höheren Temperaturen gefordert? | ja |
| 4 | Sind bei erhöhten Temperaturen auch im Langzeitverhalten Bauteilabmessungen einzuhalten? | ja |
| 5 | Sind bei Temperaturwechsel Bauteilabmessungen einzuhalten? | ja |
| 6 | Ist eine erhöhte Steifigkeit des Bauteils notwendig? | ja |
| 7 | Ist eine hohe Zähigkeit (Verformbarkeitsvermögen) notwendig? | nein |
| 8 | Ist es notwendig, aufgenommene Energie durch elastische Verformung aufzunehmen? | nein |
| 9 | Ist es sinnvoller, die aufgenommene Energie durch plastische Verformungen aufzubrechen? | nein |
| 10 | Ist eine erhöhte Verschleißfestigkeit (der Funktionsflächen) gefordert? | ja |

¹ In alten Veröffentlichungen von Ashby wurde statt der Biegefestigkeit die Druckfestigkeit von Keramik verwendet. Diese fällt noch wesentlich höher aus. Eine erstmalige Korrektur hat hier also schon stattgefunden.

| | | |
|----|--|------|
| 11 | Ist eine erhöhte chemische Beständigkeit des Materials gefordert? | ja |
| 12 | Ist eine Biokompatibilität / Lebensmittelverträglichkeit gefordert | ja |
| 13 | Ist eine bestimmte nichtmagnetische / elektrische / thermische Eigenschaft gefordert? | ja |
| 14 | Gibt es spezielle Wünsche an besondere Fertigungsmethoden des Bauteils? | nein |
| 15 | Sind die Kosten des Bauteils bei der Materialauswahl von hoher Relevanz? | nein |
| 16 | Gefährden Beschaffungs- oder Entwicklungszeiten des Werkstoffs das Gesamtprojekt? | nein |
| 17 | Spielt die Standzeit / Verfügbarkeit des zu entwickelnden Produktes für den Anwender eine große Rolle? | ja |

Die Tabelle macht deutlich, dass neben geforderten mechanischen Eigenschaften auch der Entwicklungsprozess, Fertigungsprozess, sowie die Kosten bei der Materialauswahl berücksichtigt werden müssen.

Aufgrund der gegenüber metallischen Werkstoffen aufwendigeren Fertigungsprozesse sowie der höheren Beschaffungszeiten und Kosten fällt historisch betrachtet meist erst bei der Weiterentwicklung eines Produktes die Wahl auf Keramik. Der Einsatz von Keramik im Maschinenbau soll den Einsatzbereich des Produktes erweitern (thermisch, chemisch, tribologisch) und die Standzeiten des Produktes erhöhen. Betriebswirtschaftliches Ziel ist es dann, die höheren Materialkosten durch eine wesentlich höhere Anlagenverfügbarkeit zu überkompensieren. Es muss daher eine Hauptforderung für die Konstruktion bestehen, die einen keramischen Werkstoff notwendig machen. Diese Hauptforderung kann entweder die Funktion an sich, d. h. das (erweiterte) Funktionieren überhaupt, oder die wesentliche verlängerte Standzeit und Verfügbarkeit der dazugehörigen Anlage sein.

Die Zielgrößen, bei der eine methodische Werkstoffauswahl zu keramischen Werkstoffen führen wird, sind zum Beispiel Biokompatibilität, Betriebssicherheit oder Wartungsfreiheit. Die genannten Zielgrößen haben gemein, dass die Nutzungsphase des Produktes einen wesentlichen Stellenwert in der Produktentwicklung hat, und die Kosten in der Entwicklung, Fertigung und Montage von untergeordneter Rolle sind. Um das Produkt anhand dieser Zielgrößen bewerten zu können, ist eine übergeordnete Betrachtung aller Produktlebensphasen von der Produktplanung bis zum Recycling notwendig (siehe zum Beispiel „Design to reliability“ [EHR09]).

6.1.2 Keramik im Konstruktionsprozess

Der Konstruktionsprozess kann in folgende Arbeitsschritte untergegliedert werden [EHR09]:

- Aufgabe klären
- Konzipieren (10-20%)
- Entwerfen (20-40%)
- Ausarbeiten (50–60%)

Während des Konstruktionsprozesses fällt die Wahl des Werkstoffes dabei nach [VDI2221] in die frühe Entwurfsphase. Dort findet auch die geometrische Ausgestaltung des Produktes statt (*Bild 63*).

Keramik wird aufgrund ihrer Sprödigkeit selten bei neuen Produkten in der frühen Entwurfsphase als Werkstoff gewählt. Entweder wird das Material schon in der Konzeptionsphase als Werkstoff festgelegt, da bestimmte Eigenschaften der Keramik eine neue „*prinzipielle Lösungsvariante*“ versprechen (z. B. produktgeschmierte Gleitlager in der Pumpentechnik), oder das bisher vorhandene Produkt erfüllt nicht die gestellten Anforderungen an Standzeiten und Einsatzbedingungen, so dass der Werkstoff im Zuge einer Anpassungskonstruktion zum „*Beseitigen von Schwachstellen*“ eingesetzt wird (z. B. Fadenführer in der Textilindustrie).

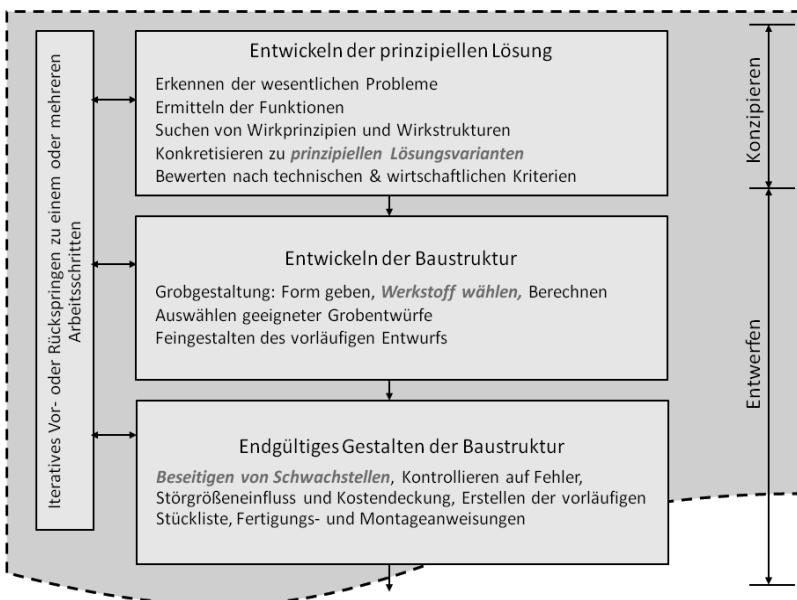


Bild 63: Werkstoffauswahl im Konstruktionsprozess [nach VDI2221]

6.1.3 Entwerfen mit keramischen Werkstoffen

Fällt die Wahl im Zuge des Konstruktionsprozesses auf einen keramischen Werkstoff, muss das keramische Bauteil üblicherweise in eine metallische Produktumgebung integriert werden. Bei einem bestehenden Produkt muss der Spannungspfad geändert bzw. das Spannungsniveau in der Struktur reduziert werden, um einen identischen Einsatzbereich abdecken zu können, da das keramische Bauteil geringere Zugspannungen erträgt als das bisher metallische ($\sigma_{zul,Keramik} < \sigma_{zul,Metall}$). Es ist daher erforderlich, die Gestalt des Bauteils grundlegend zu überdenken. Eine Funktionstrennung zwischen den mechanischen (Spannungs-)Anforderungen, die in einem metallischen Bauteil besser umgesetzt werden können, und den keramikspezifischen Anforderungen (Verschleiß minimieren, Wärmeausdehnung verhindern, Reibung reduzieren etc.) führt daher generell zu einer Differentialbauweise des Produktes.

Bei Differentialbauweise mit Keramik werden die Anforderungen an die Struktur meistens im metallische Bauteil umgesetzt, erforderliche Elastizitäten und Toleranzen werden über metallische Federn oder Elastomere abgefangen, während das keramische Bauteil die Anforderung nach Isolierung, tribologischer / chemischer Beständigkeit oder auch Biokompatibilität erfüllt. Beispiele für Komponenten in Differenzialbauweise mit keramischen Elementen sind in *Bild 64* exemplarisch zusammengestellt.

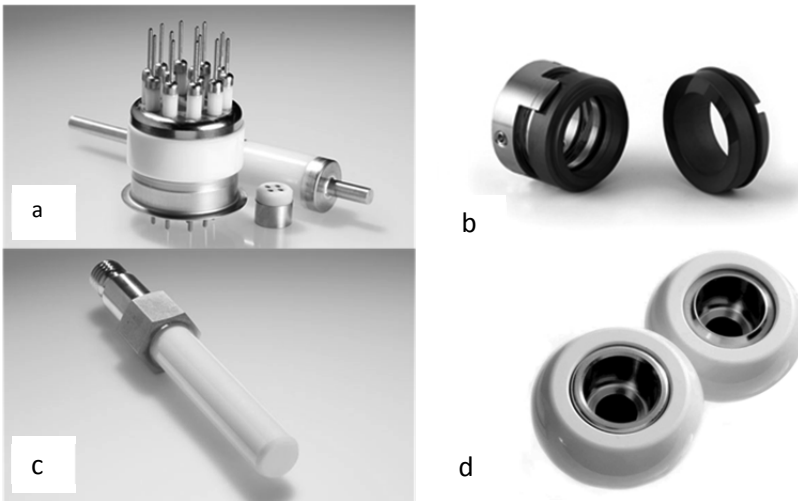


Bild 64: Differentialbauweise

- a) Durchführung für Hochvakuumanwendung [PK-FRI]
- b) Gleitringdichtung [PK-MET]
- c) Hochdruckkolben für chemische Industrie [PK-FRI]
- d) Hüftgelenkprothese [PK-CER]

Eine wesentliche Herausforderung bei der Konstruktion mit Keramik ist daher die Verbindungstechnik zwischen Keramik und den strukturbildenden metallischen Bauteilen. Diese Verbindungstechnik ist nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit. Es soll aber das grundlegende Konstruktionsprinzip einer Verbundkonstruktion mit unterschiedlichen Elastizitäten und Festigkeiten innerhalb einer Baugruppe mit keramischen Bauteilen unterstrichen werden. Die Aufgabe des Konstrukteurs liegt damit vorrangig nicht in der Berechnung einzelner Bauteile, sondern in der Systemlösung für einen „Keramikverbund“. Dieses Prinzip der Funktionstrennung wird beispielhaft durch eigene Entwicklungen in Kapitel 6.3 dargestellt.

6.2 Gestaltungsregeln für die Konstruktion mit keramischen Werkstoffen

6.2.1 Einfluss auf die rechnerische Ausfallwahrscheinlichkeit

Die Ausfallwahrscheinlichkeit eines Bauteils kann durch unterschiedliche Maßnahmen reduziert werden. In der folgenden Betrachtung wird zur Vereinfachung von einem einfachen Spannungszustand ausgegangen. Der zusätzliche Einfluss einer mehraxialen Beanspruchung wird aus *Tabelle 9* bis *Tabelle 12* ersichtlich. Es gilt bei gegebenen Werkstoffparametern σ_0 und V_0 eine Ausfallwahrscheinlichkeit von

$$P_A = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\sigma_I}{\sigma_0}\right)^m \frac{V_{Bauteil}}{V_0}\right) \quad \{57\}$$

Als variable Parameter werden die Werkstoffstreuung m , die maximale Hauptnormalspannung σ_I und die Bauteilgröße $V_{Bauteil}$ betrachtet.

Der Einfluss einer kleinen Veränderung einer der Parameter kann mit Hilfe des Fehlerfortpflanzungsgesetzes beschrieben werden als

$$\Delta P_A = \frac{\partial P_A}{\partial m} \cdot \Delta m + \frac{\partial P_A}{\partial \sigma} \cdot \Delta \sigma + \frac{\partial P_A}{\partial V_{Bauteil}} \cdot \Delta V_{Bauteil} \quad \{58\}$$

Diese setzt sich zusammen aus der Änderung des Weibullmoduls

$$\Delta P_{A,m} = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m \cdot \ln\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) \cdot \frac{V_{Bauteil}}{V_0} \cdot \exp\left(-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m \cdot \frac{V_{Bauteil}}{V_0}\right) \cdot \Delta m \quad \{59\}$$

$$\Delta P_{A,m} = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m \cdot \ln\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) \cdot \frac{V_{Bauteil}}{V_0} \cdot (1 - P_A) \cdot \Delta m \quad \{59'\}$$

der Änderung der maximalen Spannung im Bauteil

$$\Delta P_{A,\sigma} = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m \cdot m \cdot \frac{V_{Bauteil}}{\sigma \cdot V_0} \cdot \exp\left(-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m \cdot \frac{V_{Bauteil}}{V_0}\right) \cdot \Delta\sigma \quad \{60\}$$

$$\Delta P_{A,\sigma} = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m \cdot m \cdot \frac{V_{Bauteil}}{\sigma \cdot V_0} \cdot (1 - P_A) \cdot \Delta\sigma \quad \{60'\}$$

sowie der Änderung der Bauteilgröße

$$\Delta P_{A,V} = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m \cdot \frac{1}{V_0} \cdot \exp\left(-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m \cdot \frac{V_{Bauteil}}{V_0}\right) \cdot \Delta V_{Bauteil} \quad \{61\}$$

$$\Delta P_{A,V} = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m \cdot \frac{1}{V_0} \cdot (1 - P_A) \cdot \Delta V_{Bauteil} \quad \{61'\}.$$

Der Weibullmodul ist vor allem vom Werkstoff und dem Herstellungsprozess abhängig, so dass die wesentlichen zwei Konstruktionsparameter die Reduzierung der maximalen Bauteilspannung σ_l und die Reduzierung des Bauteilvolumens $V_{Bauteil}$ sind. Eine fertigungsgerechte Auslegung hat zusätzlich einen positiven Einfluss auf die Streuung und erhöht damit den Weibullexponenten m .

Am Beispiel des Rohres aus Kapitel 5.2 wird durch eine Änderung der jeweiligen Variablen um jeweils 20% der Einfluss veranschaulicht (siehe *Tabelle 15*). Die Ausfallwahrscheinlichkeit des Rohres beträgt in der ursprünglichen Auslegung 7,27 %.

Tabelle 15: Einfluss der Variablen auf die Ausfallwahrscheinlichkeit

| | Originalausführung | Reduzierung des Bauteilvolumens um 20% | Reduzierung der max. Spannung um 20% | Erhöhung des Weibullmoduls um 20% |
|----------------------------------|---------------------------|---|---|--|
| Ausfallwahrscheinlichkeit | 7,27 % | 5,87 % | 0,81 % | 0,61 % |

Eine Reduzierung der Bauteilgröße bringt keine wesentliche Verbesserung der Ausfallwahrscheinlichkeit. Der größte Effekt wird durch die Reduzierung der maximalen Hauptnormalspannung im Bauteil erreicht. Ein ähnlich großer Einfluss liegt in der Fertigung und Qualitätssicherung, die durch Reduzierung der Streuung einen ähnlich großen Effekt erzielt.

Reduzierung der maximalen Bauteilspannung

Da die zulässigen Spannungen von keramischen Bauteilen aufgrund Streuung und Größeneffekt meistens unterhalb der metallischen Zugfestigkeiten liegen (siehe Beispiele in Kapitel 4), ist es nur unter Hinnahme großer Ausfallraten möglich, metallische Bauteile aus Keramik nachzubauen. Um eine vertretbare Ausfallwahrscheinlichkeit in technischen Pro-

dukten zu erzielen, müssen Maßnahmen zur Reduzierung der maximal auftretenden Zugspannungen unternommen werden.

Bekannte mechanische Spannungen

Die Betriebslasten ergeben sich aus den Anforderungen und das Lösungsprinzip. Durch eine FE-Analyse können die Spannungen im Bauteil ermittelt und durch Optimierungsalgorithmen die Struktur optimiert werden. Durch Vergrößerung der Wandstärken und Bauteilabmessungen kann bei gleichbleibender Kraft die Spannung im Bauteil reduziert werden. Mit der gängigen FEA-Software ist es möglich, numerisch eine spannungsoptimierte Bauteilgestalt zu berechnen. Diese Vorgehensweise kann jedoch zu einer komplizierteren Gestalt führen, die konträr zu den Anforderungen im Herstellprozess stehen.

Unbekannte mechanische Spannungen

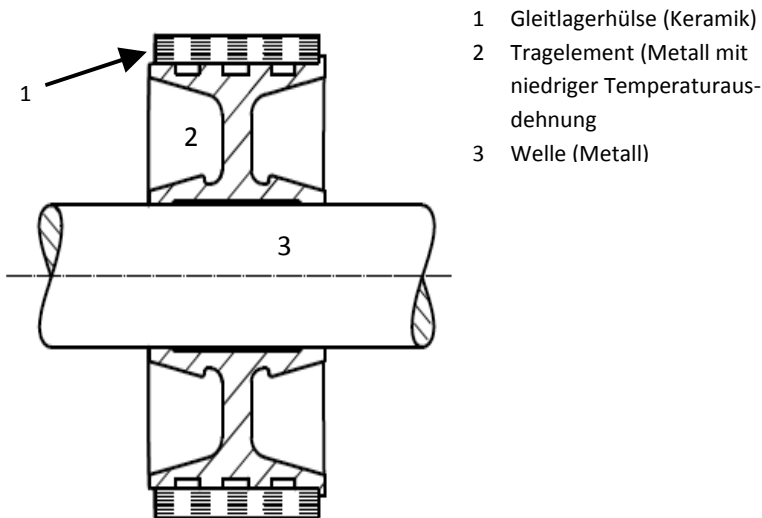
Viele Spannungen, die auf ein keramisches Bauteil wirken, sind keine mechanischen Primärspannungen, sondern Fehlspannungen, die während der Montage, der Inbetriebnahme oder der Wartung entstehen. Hierzu zählen

- Schrumpfungen, Löt- oder Klebeverbindungen, bei der die Temperaturerhöhung zu Dehnungsunterschieden zwischen den verschiedenen Bauteilen führt.
- Form- und Lagetoleranzen, die zu Kantenpressungen und lokalen Spannungsüberhöhungen führen.
- Wartungs-, Montage- und Reinigungsprozesse unter Druck oder Temperatur, die ein Mehrfaches vom Betriebsdruck bzw. der Betriebstemperatur aufweisen (chemische Industrie / Lebensmittelindustrie / Medizintechnik) und so nicht im Lastenheft erfasst sind.

Diese Fehler können nur qualitativ erfasst werden. Eine besonders schwer zu erfassende Größe sind die lokalen Spannungen in den Verbindungen zwischen Keramik und Metall bzw. Kunststoff. Kantenpressungen, Ausrichtungsfehler sowie thermisch unterschiedliche Ausdehnung führen zu lokalen Spannungsspitzen in den Kontaktflächen, die nur begrenzt vorhersagbar sind. Konstruktiv können diese durch sehr genaue Toleranzangaben, großflächige Kräfteinleitung, Verringerung der Kantenpressung durch elastische Verbindungselemente (Elastomere, Federn, gezielte Nachgiebigkeit im Gegenpartner) sowie dem Einbringen von Druckspannungen (zum Beispiel Schrumpfsitze) reduziert werden. Eine besondere Herausforderung ergibt sich für die Verbindungstechnologie zwischen Keramik und Stahl unter thermischer Beanspruchung, da die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten zu Dehnungsunterschieden in den Bauteilen führen. Diese müssen konstruktiv kompensiert werden.

Zusammenfassend können die konstruktiven Gestaltungsregeln zur Reduzierung der Bauteilspannung $\sigma_{vorh, Bauteil}$ durch folgende Maßnahmen qualitativ beschrieben werden [BRE03], [BOD96], [TIE94]

- Kräfte großflächig einleiten
- Zugspannungen konstruktiv in Druckspannungen umwandeln
- Verbindungen elastisch gestalten (duktile Zwischenschichten, elastische Elemente, Federverbindungen, Segmentbauweise)
- thermisch belastete Verbindungen konstruktiv günstig gestalten



- 1 Gleitlagerhülse (Keramik)
- 2 Tragelement (Metall mit niedriger Temperaturexpansion)
- 3 Welle (Metall)

Bild 65: Radialgleitlagerbefestigung metallische Welle / keramische Lagerhülse angelehnt an Patent [SCHÄF99]

Die prinzipielle Lösung einer Verbindung zwischen Metall und Keramik besteht in einem elastischen Zwischenelement. Die Elastizität kann entweder durch ein geringes E-Modul des Zwischenelements (Elastomere, Klebstoffe), oder durch die konstruktive Ausgestaltung des metallischen Bauteils (zum Beispiel Dehnschrauben oder Federn) erzielt werden. Ein konstruktives Beispiel mit Zwischenelement ist die Befestigung einer keramischen Lagerhülse auf einer massiven, metallischen Welle, wie sie in Bild 65 gezeigt ist.

Reduzierung des Bauteilvolumens

Die Reduzierung des Bauteilvolumens führt statistisch zu weniger Fehlern und damit zu geringeren Ausfallwahrscheinlichkeiten. Der Ansatz des reduzierten Bauteilvolumens führt

zu Lösungen mit segmentierten Keramikelemente bei der sich der Kraftfluss auf mehrere Bauteile aufteilt, oder auch zur gezielten Funktionstrennung, bei der die Keramik nur noch als Inlay seine Funktion (dichtend, gleitend, isolierend) ausübt, und das kraftübertragende Bauteil aus Metall oder Kunststoff gefertigt wird.

- Differentialbauweise bevorzugen, Keramik nur für Funktionsflächen einsetzen
- Verbundbauweise mit Segmenten vorsehen - große Bauteile in kleinere Segmente zerlegen und stoffschlüssig verbinden (kleben, löten, sintern)

Ein solches Pellet-Design für Kupplungsscheiben aus technischer Keramik wird in [ALB11b] vorgestellt.

6.2.2 Einfluss auf die optimale Werkstoffqualität

Die tatsächliche Festigkeit und Streuung (σ_c, m) des Werkstoffes im gefertigten Bauteil hängt maßgeblich von der Qualität des Ausgangspulvers sowie dessen Verdichtung im Pressvorgang ab. Weiterhin spielt die homogene Wanddicke des Bauteils eine Rolle, da hierdurch Eigenspannungen und Verzug beim Abkühlen während des Sinterprozesses reduziert werden.

Die Gestaltungsrichtlinien ähneln den bekannten Richtlinien für Gusskonstruktion. Zusammenfassend gilt [MOE08], [BRE03]

- einfache Formen verwenden und unnötige Toleranzen vermeiden
- verdichtungsgerecht gestalten
- Formgebung und Sintervorgang erleichtern
- auf möglichst gleichmäßig Wanddicke achten
- komplizierte Formen in mehrere einfache Module auflösen

6.2.3 Einfluss auf Fertigung und Kosten

Neben den unter Kapitel 6.2.1 und 6.2.2 genannten Gestaltungsregeln muss der Konstrukteur auch die Fertigung und die damit einhergehenden Kosten bei der Konstruktion berücksichtigen. Umfang der Endbearbeitung, Stückzahl sowie Fertigungsverfahren haben einen wesentlichen Einfluss auf die Kosten eines keramischen Bauteils. Diese Arbeit beschäftigt sich jedoch hauptsächlich mit den mechanischen Fragestellungen der Auslegung. Die hier aufgestellten Gestaltungsrichtlinien verhalten sich ambivalent zu den Maßnahmen der Kostenreduzierung.

Während die Verringerung der Bauteilgröße, der Verzicht auf enge Toleranzen und die Verbundbauweise mit höheren Stückzahlen den Fertigungsaufwand reduziert, kann die oft notwendige Differentialbauweise und die erforderlichen zusätzlichen Schnittstellen zu

einem wesentlichen Mehraufwand führen. Wie in Kapitel 6.1 gezeigt, muss daher grundsätzlich eine Zielgröße definiert sein, die einen Mehraufwand, der durch Keramik als Werkstoffwahl entsteht, rechtfertigt.

6.3 Beispiele für eine keramikgerechte Produktgestaltung

Der im vorigen Kapitel allgemeingültige Konstruktionsprozess mit keramischen Hochleistungswerkstoffen wird im folgenden Kapitel an zwei eigens entwickelten Produktbeispielen veranschaulicht. Zuerst wird ein keramisches Radialgleitlager aus einer bekannten Pumpenanwendung [GAF97], [Koch] konstruktionsmethodisch untersucht. Die im Rahmen der Arbeit aufgestellten Konstruktionsregeln führen zu einer Segmentbauweise, die anschließend spannungsmechanisch untersucht und bewertet werden.

Als zweites Beispiel wird die institutseigene Neuentwicklung eines Stirlingmotors vorgestellt. Im vorliegenden Kapitel werden die Anforderungen an das Zylinder-Kolben-System näher untersucht. Eine bisher nicht beherrschbare Anforderung an den Motor sind hierbei hohe Standzeiten, die in der Praxis aufgrund des vorliegenden Trockenlaufs und der hohen Temperaturen mit herkömmlichen Werkstoffen nicht erreicht werden können [WER07]. Es werden neue, konstruktive Lösungen mit keramischen Bauteilen vorgestellt, die ein großes Verbesserungspotenzial aufweisen.

6.3.1 Radialgleitlager in der Pumpenanwendung

Keramische Gleitlager haben sich in vielen Anwendungsbereichen der Kreiselpumpen durchgesetzt. Durch die guten tribologischen Eigenschaften können keramische Gleitlager mit dem Fördermedium selbst geschmiert werden, so dass auf zusätzliche Öl- oder Fettschmierung verzichtet werden kann und die Lager wartungsfrei im Gehäuse der Pumpe untergebracht werden (Heizungsumwälzpumpen, Chemiepumpen etc.). Eine besondere Ausführung findet man in den sogenannten Rohrgehäusepumpen vor, die als Kühlwasserpumpen große Volumenströme Wasser aus Flüssen oder aus dem Meer in die Kühltürme von Kraftwerken fördern. Auch in diesen Pumpen, dessen Fördermedium stark mit Sand verunreinigt ist, hat sich das keramische Gleitlager durchgesetzt. Da die Pumpen vertikal aufgestellt sind, wird die Axialkraft und die Gewichtskraft über ein Axiallager aufgefangen, während die Radiallager als Führungslager für die mehrere Meter langen Wellen eingesetzt werden. Der Aufbau einer solchen Rohrgehäusepumpe mit beschriebenen Radialgleitlagern zeigt Bild 66.

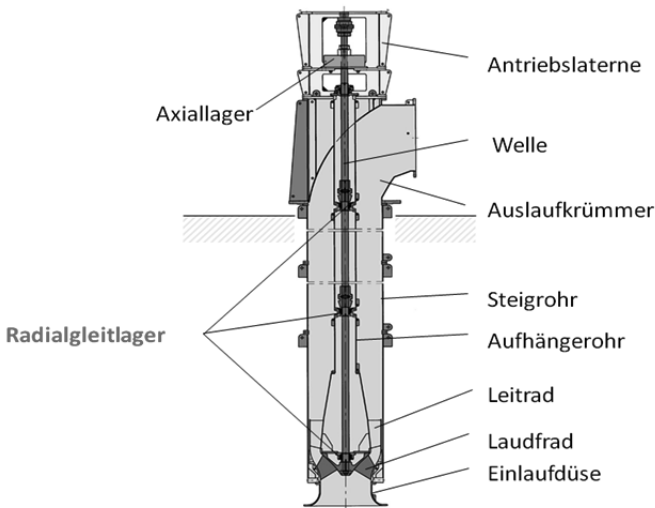


Bild 66: Aufbau einer Rohrgehäusepumpe [PK-Ksb]

Die in solchen Pumpen eingesetzten Radialgleitlager werden in folgendem Beispiel spannungsmechanisch untersucht und optimiert.

6.3.1.1 Anforderungsliste an die Radiallager in Kühlwasserpumpen

Zur Präzisierung der Aufgabenstellung wird eine Anforderungsliste für das Radiallager in Kühlwasserpumpen erstellt. Die Anforderungsliste in *Tabelle 16* enthält exemplarische Zahlenwerte. (Sie entsprechen aufgrund der Wettbewerbssituation keiner realen Baugröße).

Tabelle 16: Anforderungsliste für Radialgleitlager

| Nr. | Anforderung | Zahlenwert | Forderung /Wunsch |
|------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|
| 1 | Mechanische Belastung | | |
| 1.1 | Radialkraft | 200 kN | F |
| 1.2 | Stöße | - | F |
| 1.3 | Reibmoment | 500 Nm | F |
| 1.4 | Kontaktfläche | maximal | F |
| 2 | Geometrie | | |
| 2.1 | Wellendurchmesser | 120 mm | F |
| 2.2 | Lagersitzlänge | 60 mm - 240 mm | F |
| 2.3 | Lagerdurchmesser | ca. 200 mm | W |
| 2.4 | Buchsenlänge | Abhängig vom Lagersitz | W |
| 2.5 | Lagerspiel | 0,28 mm - 0,405 mm | F |
| 2.6 | Winkelverstellung | $\leq 3^\circ$ | F |
| 2.7 | axiales Spiel | 5 mm | F |
| 3 | Tribologie | | |
| 3.1 | geringer Reibkoeffizient | $\leq 0,1$ | W |
| 3.2 | Schmierung | produktgeschmiert | F |
| 3.3 | Notlaufeigenschaften | Trockenlauf | F |
| | | Verdoppelung | des |
| 3.4 | maximaler Verschleiß | Lagerspiels | F |
| 3.5 | Gleitgeschwindigkeit | ≤ 5 m/s | F |
| 3.6 | Temperatur | max. 60°C | F |
| 4 | Diverse | | |
| 4.1 | Korrosionsbeständigkeit | - | F |
| 4.2 | Lebensdauer | 40.000 h | F |
| 4.3 | Montierbarkeit | beidseitig | W |
| 4.4 | Kosten | gering | W |
| 4.5 | Wartung | keine | F |

6.3.1.2 Funktionen und Lösungsvarianten

In einem Funktionsschema werden die einzelnen Teilfunktionen des Radiallagers aufgezeigt (Bild 67). Diese Teilfunktionen können konstruktiv unterschiedlich gelöst werden.

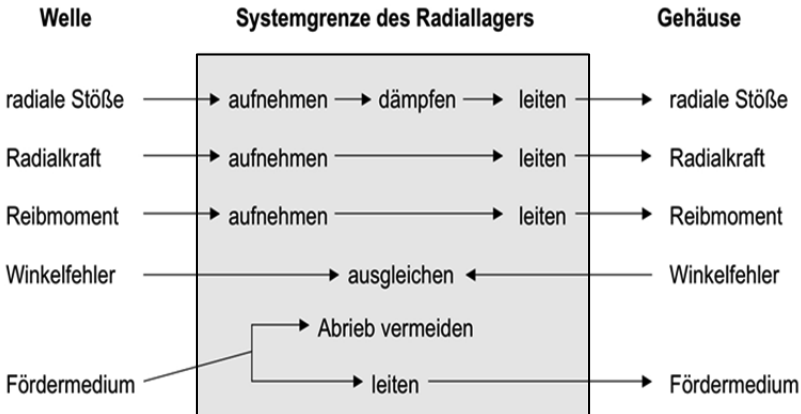


Bild 67: Funktionen eines Radialleitlagers für Rohrgehäusepumpen

Die prinzipiellen Lösungen werden in einem morphologischen Kasten aufgetragen. Hierbei werden zu jeder Teilfunktion möglichst viele Lösungen generiert (Bild 68).

Nach der Bewertung der einzelnen Lösungsvarianten werden verschiedene Lösungskonzepte erstellt. In vorliegendem Beispiel werden unterschiedlich gestaltete, einvulkanisierte Keramiksegmente gewählt, um den Flächenkontakt zwischen rotierender Lagerhülse und stehender Lagerbuchse zu vergrößern und einen Ausgleich von Winkelversatz zwischen Welle und Gehäuse zu gewährleisten (Tabelle 17). Eine solche Segmentierung – vor allem in axiale Richtung – ist nur möglich bei Führungslagern, die keine hohen gerichteten Radialkräfte aufweisen, die einen hydrodynamischen Effekt benötigen.

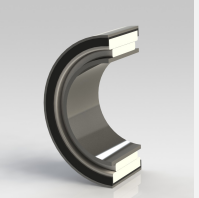
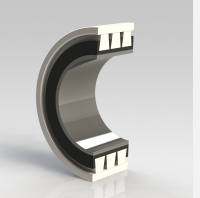
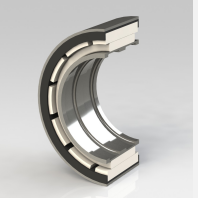
Bei einem hydrodynamischen Gleitlager sind kleine Lagerspalte und eine entsprechende zylindrische Lagerfläche erforderlich. Durch die Segmente fließt das Fluid zwischen den Segmenten ab und es ist keine ausreichende Fläche zum Druckaufbau vorhanden. In der hier vorgestellten Anwendung liegt der Fall eines Führungslagers vor, bei dem Mischreibungszustände sowie Festkörperreibung zulässig sind.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---|
| Radialkraft aufnehmen | Zylindermantelfläche | Axiale Segmentierung der Hülse | Axiale Segmentierung der Buchse | Radiale Segmentierung der Hülse | Radiale Segmentierung der Buchse | Axiale und radiale Segmentierung der Buchse |
| Stöße aufnehmen | Zylindermantelfläche | Axiale Segmentierung der Hülse | Axiale Segmentierung der Buchse | Radiale Segmentierung der Hülse | Radiale Segmentierung der Buchse | Axiale und radiale Segmentierung der Buchse |
| Stöße dämpfen | Gummierung der Hülse | Metallische Nachgiebigkeit an Hülse | Metallische Nachgiebigkeit an Buchse | Federn an Buchse | | |
| Drehmoment übertragen | Passfeder | Klebung | Vulkanisation | Presssitz | Axialer Reibschluss | |
| Winkelfehler ausgleichen | Gelenk im Lagerdeckel | Vergrößerung des Lagerspaltes | Elastische Nachgiebigkeit | Ballige Laufflächen | | |

Bild 68: Lösungsvarianten der einzelnen Teilfunktionen im morphologischen Kasten

Eine Ausführung aus anderen Materialien mit niedrigerer ertragbarer Reibleistungsdichte, wie z. B. Metall, ist in der Anwendung nicht möglich.

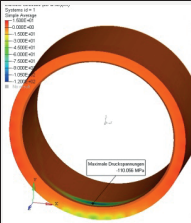
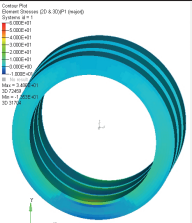
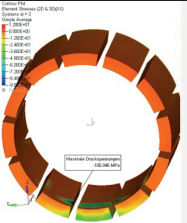
Tabelle 17: Konstruktionslösungen des Radiallagers mit keramischen Gleitsegmenten

| | | | |
|---|--|---|--|
| Teilfunktion |  Lösung 0 Stand der Technik |  Lösung 1 Axiale Segmentierung |  Lösung 2 Radiale Segmentierung |
| Radialkräfte und Stöße aufnehmen | Hülse: Hohlzylindermantelfläche Buchse: Hohlzylindermantelfläche | Hülse: Hohlzylindermantelfläche Buchse: axiale Segmentierung | Hülse: radiale Segmentierung Buchse: Zylindermantelfläche |
| Stöße dämpfen | Hülse: - Buchse: Gummierung | Hülse: Gummierung Buchse: - | Hülse: metallische Nachgiebigkeit Buchse: Gummierung |
| Drehmoment übertragen | Hülse: Passfeder Buchse: Vulkanisation | Hülse: Vulkanisation Buchse: Passfeder und Presssitz | Hülse: Presssitz Buchse: Vulkanisation |
| Winkelfehler ausgleichen | Hülse: - Buchse: elastische Nachgiebigkeit | Hülse: elastische Nachgiebigkeit Buchse: - | Hülse: elastische Nachgiebigkeit Buchse: elastische Nachgiebigkeit |

Die verschiedenen Lösungen werden in konstruktive Entwürfe umgesetzt und die Spannungsverläufe numerisch berechnet. Als keramischer Werkstoff wird Siliziumcarbid mit einem E-Modul von $E = 360 \text{ GPa}$ und einer Querkontraktionszahl von $\nu = 0,17$ gewählt. Für die Ausfallwahrscheinlichkeit wird eine Vierpunktbiegespannung von $\sigma_{0,P} = 400 \text{ MPa}$ mit einem Weibullmodul von $m = 9$ zugrunde gelegt.

Die einzelnen Ausfallwahrscheinlichkeiten werden der ursprünglichen Konstruktion mit zylindrischer Lagerbuchse und -hülse (Variante 0) gegenübergestellt. Dabei wird deutlich, dass eine Segmentierung in axialer Richtung mit entsprechender Gummierung wesentlich geringere Flächenpressungen aufweist und damit auch die maximalen Hauptnormalspannungen in der Keramik bei gleicher Belastung des Lagers erheblich reduziert werden kann. Die einzelnen Werte der maximalen Flächenpressung und der maximalen Hauptnormalspannung bei Nennbelastung mit Winkelfehler ist in *Tabelle 18* zusammengefasst.

Tabelle 18: Spannungsberechnung (FEA) bei Lager mit Schrägstellung

| | | | | |
|--|---|---|---|---------|
| Spannungsbe- rechnung |  |  |  | |
| | Lösung 0 | Lösung 1 | Lösung 2 | |
| | Maximale Flächenpressung | 110 MPa | 61 MPa | 107 MPa |
| | maximale Haupt- normalspannung | 89 MPa | 35 MPa | 148 MPa |
| Ausfallwahrschein- lichkeit | 0,016% | 0,00021% | 0,31 % | |

Die Segmentierung der keramischen Lagerflächen führt in der Auslegung nicht nur zu niedrigeren Spannungen, sondern es reduziert sich gleichzeitig das effektive Volumen. Der wesentliche Anteil der konstruktiven Verbesserung liegt jedoch in der Spannungsreduzierung, die durch eine Vergleichmäßigung der Flächenpressung im Lagerspalt erzielt wird.

Die Idee der axialen Segmentierung (Lösung 1) wird in einer institutseigenen Patentanmeldung weiterverfolgt.

Zur Veranschaulichung ist in *Bild 69* die Ausfallwahrscheinlichkeit über die Spannung für die verschiedenen Lagervarianten aufgetragen. Durch axiale Segmentierung (Lösung 1) kann die rechnerische Ausfallwahrscheinlichkeit von 0,016% auf 0,00021% verringert werden.

Die radiale Segmentierung wirkt sich dagegen negativ aus, da im Wesentlichen nur ein einzelnes Segment im Eingriff ist und dieses zusätzlich auf Biegung beansprucht wird. Die rechnerische Ausfallwahrscheinlichkeit liegt hier bei 0,31 % und fällt damit schlechter aus als die ursprüngliche, zylindrische Ausführung.

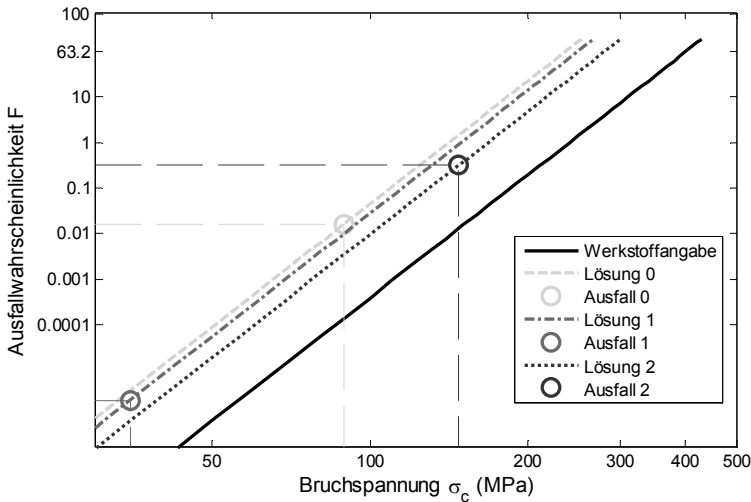


Bild 69: Maximale Hauptnormalspannung und dazugehörige Ausfallwahrscheinlichkeit unterschiedlicher Lagervarianten in %

Die axial segmentierte Lösung 1 ist damit die zu favorisierende Bauart. Die Segmentgröße selbst spielt für die Verbesserung dabei keine wesentliche Rolle. Der Größeneinfluss ist bei allen Lösungen ähnlich, was daraus ersichtlich ist, dass die Ausfallgeraden in *Bild 69* sehr dicht beieinander liegen. Der Verbesserung der Ausfallwahrscheinlichkeit ist dagegen auf die Reduzierung der Zugspannungen zurückzuführen, die durch die verbesserte elastische Verbindung (siehe Kapitel 6.2.1) erzielt wurde.

6.3.2 Zylinder-Kolben-Baugruppe eines Stirlingmotors

Konstruktiv unterscheidet sich der Stirlingmotor von anderen Verbrennungsmotoren durch sein abgeschlossenes Arbeitsgas. Während bei den bekannten Otto- sowie Dieselmotoren zyklisch neues Verbrennungsgemisch die Arbeitszylinder passiert, arbeitet der Stirlingmotor mit einem abgeschlossenen Arbeitsgas, das zyklisch unterschiedlichen Drücken und Temperaturen ausgesetzt ist. In den realisierten Stirlingmotoren ist ein thermischer Zwischenspeicher notwendig, ein sogenannter Regenerator, der sehr feinmaschig ausgeführt wird und daher keine flüssigen Stoffe oder Feststoffe im Arbeitsgas zulässt.

Der Stirlingmotor weist einen hohen theoretischen Wirkungsgrad auf, der in der Praxis bisher jedoch noch nicht erreicht wurde [WER07]. In den Zylindern des Motors liegen tribologische sowie mechanische Beanspruchungen unter hoher Temperatur vor. Aufgrund des thermodynamischen Prozesses können keine Schmierstoffe im heißen Bereich des Motors eingesetzt werden. Keramische Hochleistungswerkstoffe sind bisher in diesem Einsatzbereich nicht zu finden, weisen jedoch das konstruktive Potenzial auf, um diese extremen Anforderungen an Temperatur, Tribologie und Mechanik besser zu erfüllen als bisher eingesetzt Werkstoffe.

Im folgenden Kapitel wird daher der Einsatz von Keramik im Stirlingmotor – speziell in der Kolben-Zylinder-Baugruppe – näher untersucht. Es wird dabei nicht auf das gesamte Motorkonzept eingegangen, sondern nur auf die Anforderungen an die Zylinder-Kolben-Baugruppe. Wie in *Bild 70* veranschaulicht, unterliegt der Kolben einer zyklischen, translatorischen Bewegung, während der Temperaturgradient über die axiale Kolbenlänge konstant bleibt. Parallel zu der Kolbenbewegung werden die Kolbenflächen wechselseitig mit Druck beaufschlagt.

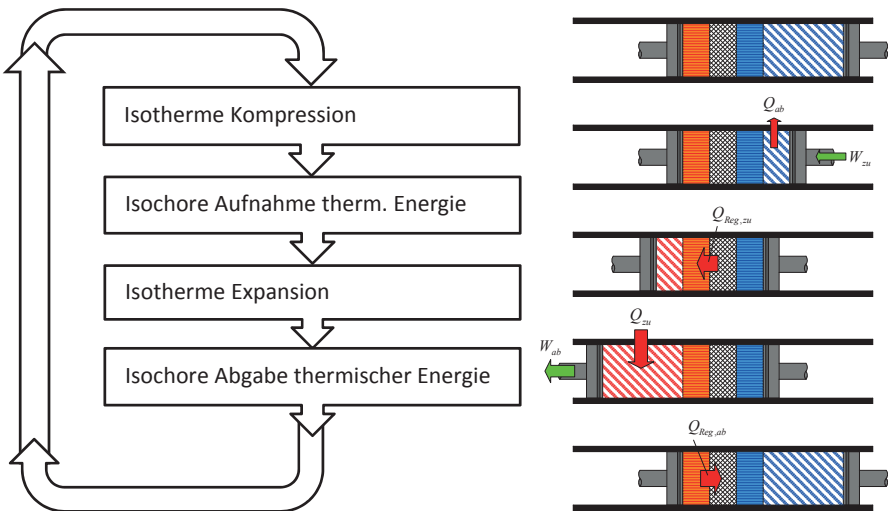


Bild 70: Kinematik und Temperaturbeanspruchung eines Stirlingkolbens

6.3.2.1 Aufbau des Stirlingmotors

Ein Schnitt durch den Entwurf des entwickelten Stirlingmotors ist in *Bild 71* gezeigt. Die untersuchte Einheit besteht aus vier um jeweils 90° versetzte Zylinder. Im Betrieb entsteht beim Aufheizen der Zylinderköpfe eine sinusförmige translatorische Bewegung, die über

ein Hypozykloidgetriebe in eine Rotationsbewegung gewandelt wird. Diese kinetische Energie kann dann für mechanische Arbeit verwendet oder über einen Generator in elektrische Energie gewandelt werden.

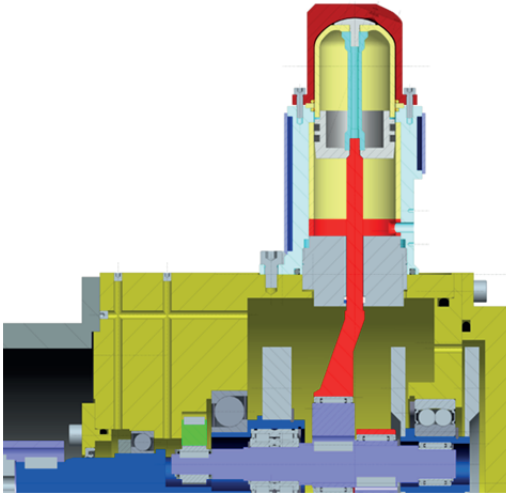


Bild 71: Ausschnitt durch die mechanische Stirling-Einheit

Wesentlich für die Zylinder-Baugruppe ist, dass der Kolben neben der Bewegung durch zyklische Druckpulsation (Bild 72, links) mit einem stationären Temperaturgradienten (Bild 72, rechts) beaufschlagt wird.

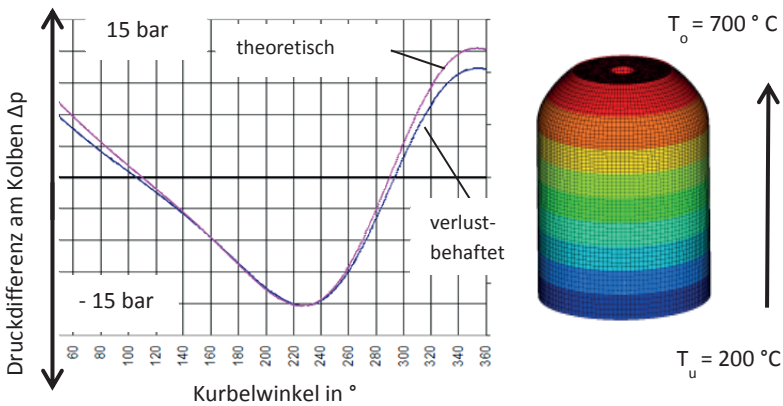


Bild 72: Druckverlauf (links) und Temperaturgradient (rechts) am Stirlingkolben

6.3.2.2 Anforderungsliste für die Zylinder-Kolben-Einheit

Aus mehreren Arbeiten am Institut über einen Vierzylinder-Stirlingmotor wurden die Anforderungen für eine keramische Zylinder-Kolben-Einheit zusammengetragen (Tabelle 19). Als Anwendung wird der stationäre Betrieb eines Stirlingmotors zur Stromerzeugung in einem sogenannten „Mini-BHKW“ (Blockheizkraftwerk) gewählt. Der Motor wird in dieser Anwendung in den Heizkreislauf eines Einfamilienhauses integriert und produziert über einen Generator zusätzlichen Strom. Als Auslegungsgröße wird eine elektrische Leistung von ca. $P_{el} = 2 \text{ kW}$ zu Grunde gelegt.

Tabelle 19: Anforderungen an die keramische Zylinder-Kolben-Einheit eines Stirling-Motors

| | Anforderungen | Ausprägung | Einheit | Art |
|------------------|--|--|---|------------|
| Geometrie | Durchmesser | 50 | mm | F |
| | Hub | 45 | mm | F |
| | Zylinderhöhe | 135 | mm | W |
| | Raum Anforderungen | Expansions- von Kompressionsraum trennen | | F |
| | Anschluss | Getriebe | | F |
| Kinematik | Bewegungsart | Translatorisch (sinusförmig) | | F |
| | Geschwindigkeit/ Frequenz | 12,5 | Hz | F |
| | Translatorische Ungenauigkeiten ausgleichen | x-Richtung: ± 11 y-Richtung: ± 6 z-Richtung: ± 12 | μm μm μm | F |
| | rotatorische Ungenauigkeiten ausgleichen | um die x-Achse: $\pm 2,2 \cdot 10^{-3}$ um die z-Achse: $\pm 2,2 \cdot 10^{-3}$ | $^{\circ}$ $^{\circ}$ | F |
| Kräfte | Gewicht | möglichst gering (min. Massenkräfte) | kg | W |
| | Kolbenstangenkraft (max. Zugkraft) | 1.700 | N | F |
| | Kolbenstangenkraft (max. Druckkraft) | -2.000 | N | F |
| | Druckdifferenz (zwischen Expansions- und Kompressionsraum) | max. $\pm 1,5$ | MPa | F |

| | Anforderungen | Ausprägung | Einheit | Art |
|-----------------------|---|-------------------------------|----------------|------------|
| Wärmeenergie | maximale Druckbelastung | max. 3 | MPa | F |
| | Getriebedruck (konstant) | 1,9 | MPa | F |
| | Temperatur | Tu=420; To=920 | K | F |
| | Temperaturschock | resistent | | F |
| | Erwärmung (Q _{zu}) | 1200/ Zylinder | W | F |
| | Kühlung (Q _{ab}) | 670/ Zylinder | W | F |
| | axiale Wärmeleitfähigkeit | niedrig | W/(m* K) | W |
| Stoffe | radiale Wärmeleitfähigkeit | hoch | W/(m* K) | W |
| | Arbeitsgas | Stickstoff / Luft | | F |
| | Vorzuziehender Werkstoffe | Keramik | | W |
| Gebrauch | Eingesetzte Materialien | relativ gasdicht sein | | W |
| | Tribologie | gute Trockenlaufeigenschaften | | F |
| | Reibungsverluste | möglichst gering | W | W |
| Instandhaltung | Wartungsfreiheit bzw. Anzahl und Zeitbedarf der Wartung | 10.000-20.000 | h | F |
| | Besondere Montagevorschriften | montagefreundlich | | W |

6.3.2.3 Funktionsstruktur und Lösungsvarianten

Zur Lösungsfindung wird eine Funktionsstruktur aufgestellt (*Bild 73*), die die Teilaufgaben der Zylinder-Kolben-Baugruppe veranschaulicht. Die kolbenspezifische Teilfunktion ist das Sicherstellen einer ungeschmierten, verschleißfreien Dichtung zwischen stehendem Zylinder und gleitendem Kolben. Weiterhin muss der Kolben die Arbeitsräume oberhalb und unterhalb möglichst gut thermisch voneinander isolieren. Wegen der erforderlich engen Dichtspalte muss sichergestellt werden, dass Passungsungenauigkeiten aus dem Getriebe sich nicht in der Zylinder-Kolben-Einheit fortsetzen können. Zusätzlich wird der Kolben mit einer zyklisch wechselnden Druckdifferenz des Arbeitsmediums beaufschlagt.

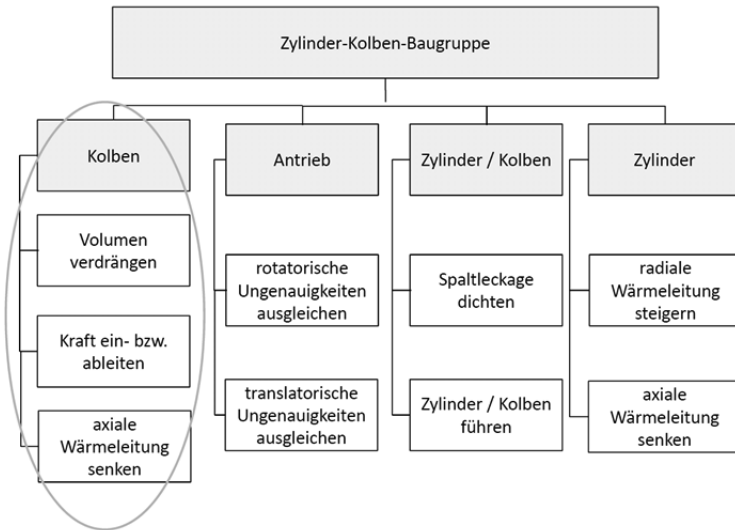


Bild 73: Funktionsstruktur der Zylinder-Kolben-Baugruppe eines Stirling-Motors

Zu den einzelnen Teilfunktionen werden im morphologischen Kasten möglichst viele Lösungen zusammengestellt. Der morphologische Kasten für die erarbeiteten Teilfunktionen ist in *Bild 74* veranschaulicht. Bei näherer Betrachtung der Teillösungen wird deutlich, dass sowohl die Gestaltung des keramischen Kolbenkörpers (Teilfunktion Volumen verdrängen), als auch die Wahl der mechanischen Befestigung (Kräfte ableiten / Ungenauigkeiten ausgleichen) wesentlichen Einfluss auf die tatsächlichen Spannungen im Bauteil haben werden.






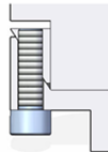
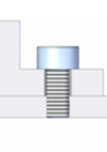
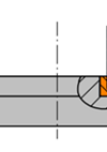
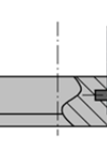

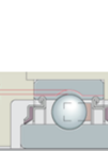

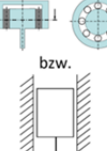
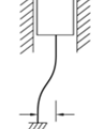

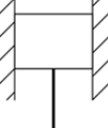




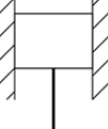
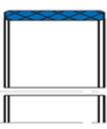



| Teilfunktionen | Lösungsprinzipien | | | | |
|---|---|---|--|---|---|
| Volumen verdrängen | Aus dem Vollen (VV4) | Kolben mit Dämmmaterial (VV2) | Kolben mit Zwischenböden (VV3) | Hohler Kolben (VV1) | Zusammengesetzter Kolben (VV5) |
| |  |  |  |  |  |
| Kräfte ein- bzw. ableiten | Spannelement (KEA4) | Schraubverbindung (KEA3) | Kleerverbindung (KEA1) | Bolzenverbindung (KEA2) | Schrumpfverbindung (KEA5) |
| |  |  |  |  |  |
| translatorische Ungenauigkeiten Ausgleich | Lagerbetriebspiel (UA5) | Wellengelenk-Einfach (UA3) | Nachgiebiges Element (UA4) | T-Form (UA1) | |
| |  |  |  bzw.  |  | |
| rotatorische Ungenauigkeiten Ausgleich | | | | Gelenklager (UA2) | |
| Spaltleckage dichten | Enger Spalt (SD3) | Labyrinthspaltdichtung (SD5) | Kolbenring (SD2) | Flexibles Element (SD6) | Kolbendichtung nach Literatur (SD3) |
| |  |  |  |  |  |
| Zylinder/ Kolben führen | Enger Spalt (KF3) | Führungsband (KF1) | Gleitlagerbuchse (KF2) | Führungsbandauflage (KF5) | Segmentführung (KF4) |
| |  |  |  |  |  |

Bild 74: Morphologischer Kasten zur Lösungsfindung von Teilfunktionen einer Kolben-Zylinder-Baugruppe

Vier verschiedene Lösungsvarianten, die nach Bewertung einzelnen Lösungsprinzipien erstellt wurden, sind in *Bild 75* dem ursprünglichen Kolbenentwurf gegenübergestellt.

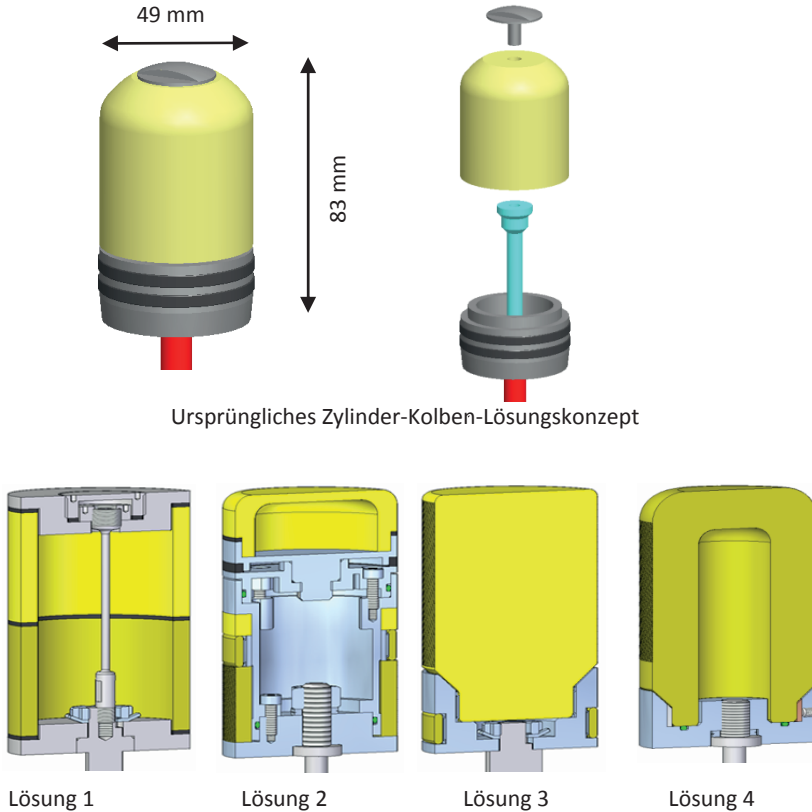


Bild 75: Kolbenkonzepte eines Stirlingkolbens mit Führungs- und Dichtfunktion

Die Kolben sind unterschiedlich gestaltet. Neben der Spannungsanalyse sind Fragestellungen der Dichtung, Führung und Befestigung zu klären. Die Entwürfe sind als Vorschläge zu verstehen. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Strukturmechanik unter Druck und Temperatur näher betrachtet. Untersucht wird der Einfluss der Gestalt und Werkstoffwahl auf die Festigkeit des keramischen Bauteils.

6.3.2.4 Spannungsberechnung der Kolbenlösungen

Die konstruktive Bewertung der Kolbenvarianten weist Lösung 1 als die mit dem größten Potenzial aus. Sie besteht aus einem thermisch isolierenden Bauteil aus Oxidkeramik, sowie

einem dichtenden, trockenlaufenden Lagerungsring aus Siliziumcarbid. Diese Lösung 1 wird spannungsmechanisch näher betrachtet und dem ursprünglichen Lösungskonzept (Lösung 0) gegenübergestellt (siehe *Bild 76*).

Beim ursprünglichen Konzept, welches vorab ohne methodisches Vorgehen erstellt wurde, wird nur die thermische Isolierung von einer Oxidkeramik übernommen, die Dichtung ist hier konventionell mit O-Ringen gelöst. Diese Dichtung bedeutet eine konstruktive Schwachstelle, die in Variante 1 durch einen keramischen Dichtspalt ersetzt wird. Die Dichtwirkung beider Varianten muss in weiteren Arbeiten noch gesondert untersucht werden. In dieser Arbeit über Strukturkeramik wird dagegen näher auf die Spannungsmechanik eingegangen.

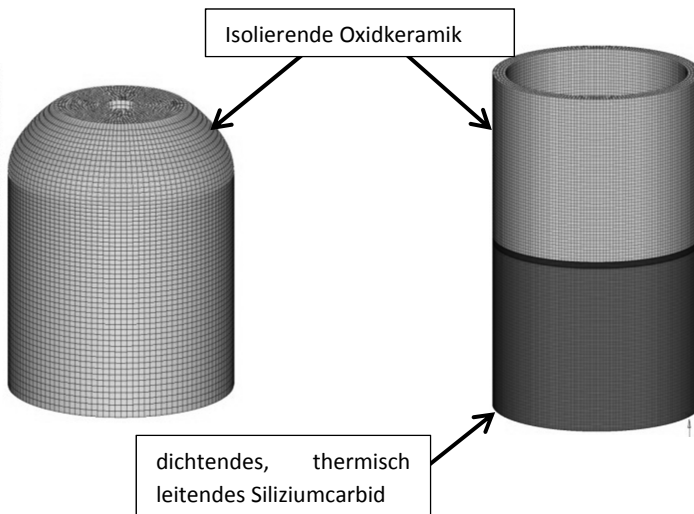


Bild 76: Kolbengeometrie und Vernetzung von Lösung 0 (links) und Lösung 1 (rechts)

Die Variante 1 zeichnet sich dadurch aus, dass sie aus zwei einfachen zylindrischen Keramikhülsen besteht, die durch einen metallischen Zuganker verspannt werden. Die zwei unterschiedlichen Keramikarten mit unterschiedlicher Leitfähigkeit bewirken einen nichtlinearen Temperaturverlauf. Der untere Teil übernimmt gleichzeitig die Lager- sowie Dichtfunktion für das Kolbensystem. Durch die gegenüber dem oberen Kolbenelement hohe thermische Leitfähigkeit bleibt der untere Bereich des Kolbens kalt (*Bild 77*). Er unterliegt damit keiner Temperaturdehnung. Durch diese konstruktive Lösung können sehr enge Spalte gewählt werden, die die Dichtfunktion des Systems gewährleisten.

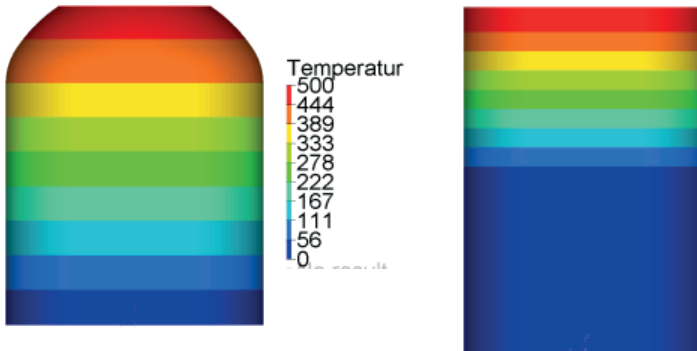


Bild 77: Temperaturverlauf verschiedener Keramikkolbenentwürfe eines Stirlingmotors (links Lösung 0, rechts Lösung 1)

Beide Varianten werden mit einem metallischen Zuganker befestigt. Während Variante 0 über die Verankerung nur fixiert wird, ist bei Variante 1 eine mechanische Verspannung der zwei Buchsen vorgesehen. Wie die Spannungsbetrachtung zeigt, spielt die Befestigung und die hierdurch eingebrachten mechanischen Druckspannungen jedoch eine untergeordnete Rolle. Die größten Spannungen werden nicht durch die mechanische Beanspruchung, sondern durch die Temperaturdehnung hervorgerufen. Die Hauptnormalspannungen der überlagerten Gesamtbeanspruchung (thermisch und mechanisch) ist in *Bild 78* dargestellt.

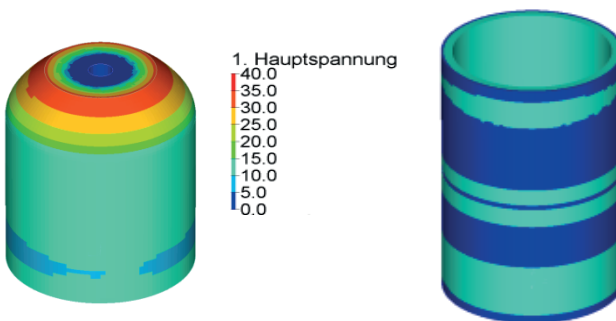


Bild 78: Normalspannungsverlauf unter Druck- und Temperaturbeanspruchung (links Lösung 0, rechts Lösung 1)

Die zylindrische Ausführung der Variante 1 weist nur ca. 50% der Maximalspannung der ursprünglichen Variante mit Ausführung eines keramischen Doms. Die wesentlichen Zug-

spannungen werden durch die anstehenden Temperaturgradienten verursacht. Weitere Spannungen entstehen in den Verbindungsflächen. Im Modell wurde zwischen den beiden keramischen Hülsen eine Dichtung vorgesehen, die die unterschiedlichen Ausdehnungen im axialen Spalt kompensiert. Die zylindrische Ausführung hat auch fertigungstechnische Vorteile, so dass zusätzlich von einer günstigeren Streuung des Werkstoffes ausgegangen werden kann (weniger Verzug beim Sintern, bessere Bearbeitungsmöglichkeiten der Oberflächen). Die Daten der FE-Analyse sind für eine Temperaturdifferenz $\Delta T = 500 \text{ K}$, einen Innenüberdruck von $\Delta p = 15 \text{ bar}$ und einer axialen Schraubenspannkraft von $F = 1,88 \text{ MPa}$ in Tabelle 20 zusammengestellt.

Tabelle 20: Mechanisch-thermischer Vergleich zwischen Lösung 0 und Lösung 1

| | Lösung 0 | Lösung 1 |
|---|-----------------|-----------------|
| Siliziumcarbid $E = 350 \text{ GPa}, \nu = 0,15$ $\alpha = 4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}, \lambda = 140 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ | | X |
| Teilstabilisiertes ZrO_2 $E = 200 \text{ GPa}, \nu = 0,3$ $\alpha = 11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}, \lambda = 2 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ | X | X |
| Maximale Hauptnormalspannung $\sigma_{I,max}$ | 32,9 MPa | 15,6 MPa |
| Maximale radiale Dehnung des Gesamtkolbens δ | 0,105 mm | 0,127 mm |
| Maximale radiale Dehnung in der Dichtfuge δ | 0,105 mm | 0,0014 mm |
| Wärmeverlustleistung über den Kolben \dot{Q} | 8,04 W | 9,96 W |

Obwohl der Kolben in Lösung 1 nur zur Hälfte aus isolierende Keramik besteht, weisen beide Lösungen ähnlich hohe Wärmeverluste von unter 10 W auf, da die Wandstärke in Lösung 1 dünner ausgeführt werden kann als in Lösung 0. Der Wärmestrom über die vier Kolben des Motors mit $P_{\text{verl}} < 40 \text{ W}$ bedeutet eine Verlustleistung von unter 2% bezogen auf die elektrische Leistung des Motors.

In beiden Entwürfen weitet sich die Oxidkeramik im heißen Bereich des Kolbens um ca. $\delta = 100 \mu\text{m}$ auf. Das Zylindergehäuse ist jedoch gekühlt, so dass der Zylinder kalt bleibt. Der Kolben muss daher mit einem entsprechenden Untermaß ausgeführt werden, um im Betrieb nicht zu klemmen. Bei Lösung 1 weitet sich nur die Oxidkeramik auf, der untere Bereich aus Siliziumcarbid befindet sich im kalten Bereich. Hier kann eine sehr feine Passung zwischen Kolben und Zylinder gewählt werden.

Auf die Dichtungstechnik der Stirling-Ausführungen soll nicht weiter eingegangen werden, da die vorliegende Arbeit die spannungsmechanischen Aspekte untersucht. Weitere Untersuchungen am Stirling-Motor sind geplant.

Die Idee des keramischen Kolbens wird unter der Bezeichnung „Doppel-Keramik-Kolben“ – TU 234 von der Patentverwertungsagentur der TUHH weiter verfolgt. Eine Patentanmeldung ist erfolgt.

Die numerischen Spannungsberechnungen werden abschließend noch einmal genutzt, um das unter Kapitel 4 eingeführte Auslegungsverfahren an einem Bauteil mit komplexerer Beanspruchung anzuwenden.

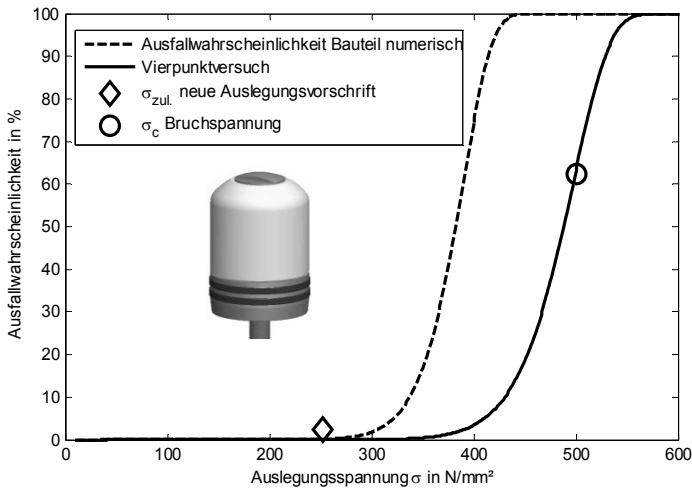


Bild 79: Ausfalldiagramm und zulässige Auslegungsspannung für Lösung 0 aus Oxidkeramik

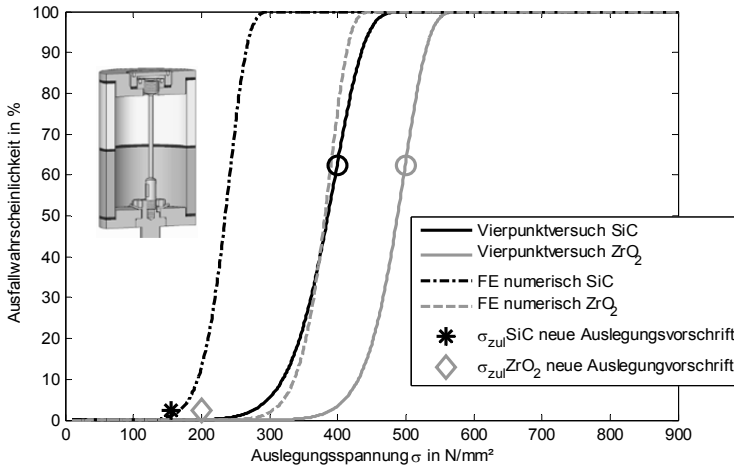


Bild 80: Ausfallwahrscheinlichkeiten und zulässige Auslegungsspannung für den Doppelkolben der Lösung 1 aus SiC und ZrO₂

In Bild 79 ist die numerisch berechnete Ausfallwahrscheinlichkeit für den Kolben der Variante 0 dargestellt. Parallel dazu verläuft die zugrunde gelegte Werkstoffkurve. Die nach neuer Auslegungsvorschrift ermittelte zulässige Bauteilspannung $\sigma_{zul,Bauteil}$ ist als Raute in das Ausfalldiagramm eingezeichnet.

Für den Doppelkolben aus Lösung 1 ergeben sich zwei Auslegungskurven, einmal für die kalte SiC-Keramik, eine weitere für die isolierende Oxidkeramik. In Bild 80 ist der untere Zylinder aus Siliziumcarbid in schwarz, der isolierende obere Zylinder in grau dargestellt.

Beide Diagramme (Bild 79 und Bild 80) bestätigen, dass sich auch bei komplexeren Spannungszuständen über die neu entwickelte Auslegungsvorschrift zulässige Bauteilspannungen $\sigma_{zul,Bauteil}$ ermitteln lassen, die nahe an der numerischen Ausfallwahrscheinlichkeitsverteilung liegen. Die errechnete zulässige Bauteilspannung liegt jeweils leicht unterhalb der numerischen Kurve, so dass die Auslegungsvorschrift konservative Werte ermittelt.

6.3.3 Abgeleitetes konstruktives Vorgehen

Aus den Konstruktionsbeispielen wird deutlich, dass eine wesentliche Aufgabe des Konstrukteurs in der Reduzierung der Zugspannungen in den keramischen Bauteilen besteht. Diese konstruktive Zielsetzung führt zu einer einfachen Geometrie und möglichst kleinen Bauteilen. Dieses gilt seit langem als allgemeine Auslegungsregel für keramische Konstruktionen.

Die Beispiele machen deutlich, dass es nicht ausreicht, das keramische Bauteil zu betrachten. Die Berücksichtigung der einzelnen Teilfunktionen eines mechanischen Systems mit keramischen Komponenten führt zu einer Verbundkonstruktion, bei der die Keramik nur die ihr zugeschriebenen Teilfunktionen übernimmt. Elastizitäten und Kraftübertragung werden durch zusätzliche metallische oder elastomere Komponenten übernommen.

Diese oft notwendige Differenzialbauweise führt zu einer gegenüber rein metallischen Ausführungen aufwendigen Fertigung, Montage sowie konstruktiven Auslegung. Eine wesentliche konstruktive Aufgabe ist es, spannungsoptimierte Verbindungstechniken einzusetzen und eine Entkopplung der Temperaturdehnungen in den Komponenten aus unterschiedlichen Materialien vorzunehmen.

Beide Konstruktionsbeispiele zeigen, dass eine starke Anlehnung an bisherige nicht-keramische Lösungen zu hohen Spannungen im Bauteil führen. Das Aufstellen einer werkstoffunabhängigen Funktionsstruktur machen sichtbar, welche Teilfunktionen von keramischen Werkstoffen übernommen werden sollen. Das hier gezeigte methodische Vorgehen kann zu neuen Lösungen führen, die von der ursprünglichen Gestalt der nichtkeramischen Lösung entkoppelt sind.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung der Untersuchungen

Die vorliegende Arbeit zeigt eine grundlegende Vorgehensweise für das Entwerfen mit keramischen Bauteilen auf. Hiermit knüpft sie an einzelne Bauteiluntersuchungen an, die am Institut in vorangegangenen Arbeiten durchgeführt wurden. Die bisherigen Untersuchungen beinhalteten vor allem detaillierten Spannungsuntersuchungen und analytische Lebensdauerberechnungen an Bauteilen, ohne dass eine Allgemeingültigkeit für den Auslegungsprozess abgeleitet wurde. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich eingehend mit der Bruchmechanik und den möglichen Ermüdungsvorgängen bei Keramik. Durch Integration des neuesten Standes der Technik und ergänzender Versuche wird ein generelles Vorgehen beim Entwerfen mit keramischen Werkstoffen entwickelt.

Inhalt dieser Arbeit ist es, auf bisherige Ergebnisse aufbauende, allgemeingültige Aussagen zum Verhalten von Strukturbauteilen aus Keramik zu treffen. Es werden nach einer Darstellung des neuesten Wissensstandes eigene, experimentelle Untersuchungen an bauteilähnlichen Proben zusammengefasst und analysiert. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen an bauteilähnlichen Proben sind in dieser Art einzigartig, es können erstmalig natürliche Anrisse unter zyklischer Beanspruchung in Probekörper reproduzierbar erzeugt werden, ohne dass ein Gesamtbruch zur Zerstörung der Probe führt.

Anhand der Ergebnisse, die unter zwei verschiedenen Spannungszuständen ermittelt werden, wird die Übertragbarkeit von einaxialen statischen Versuchen auf zyklisch beanspruchte Bauteile untersucht. Es wird bestätigt, dass für die Auslegung von Strukturbauteilen aus Keramik die Normalspannungshypothese zu wählen ist. Dabei werden die drei unterschiedlichen Arten zur Ermittlung einer Vergleichsspannung gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass die Normalspannungshypothese mit Riss die Mehraxialität am besten abbildet, der rechnerische Aufwand jedoch am größten ist.

Die tatsächliche Aussagekraft der einzelnen Hypothesen weichen dagegen nur wenig voneinander ab. Es wird auf weitere Größen in der Konstruktion eingegangen, die einen Einfluss auf die Ausfallwahrscheinlichkeit der Bauteile haben.

Weiterhin wird gezeigt, dass das unterkritische Risswachstum bei der Auslegung von Strukturbauteilen eine wesentliche Rolle spielt. Dabei verhalten sich die einzelnen Keramikarten sehr unterschiedlich. Durch die Extrapolation von Risswachstumsdaten erhält man eine Abschätzung des Rissfortschritts, ohne dass zwischen zyklischem und statischem Risswachstum unterschieden werden kann. Anhand von Vergleichsrechnungen wird gezeigt, dass eine reine Extrapolation der statischen Werkstoffdaten, wie bisher durchgeführt, zu einer zu konservativen Lebensdauerabschätzung führt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird erstmalig ein vereinfachtes Auslegungsverfahren entwickelt, um auch ohne umfassendes Werkstoffwissen in der Entwurfsphase eines Entwicklungsprozesses keramische Bauteile auslegen zu können. Mit diesem neuen Vorgehen kann der Konstrukteur analog zu den metallischen Auslegungsvorschriften über ein Tabellenwerk die zulässige Vergleichsspannung für keramische Werkstoffe ermitteln.

Das Verfahren wird auf einfache Strukturbauteile angewendet und mit der komplexen Auslegungsmethode mit Finite-Elemente-Analyse und numerischer Integration verglichen. Es wird gezeigt, dass für die Entwurfsphase, in der noch kein detailliertes Werkstoffwissen erforderlich sein soll, die Abschätzung einer Vergleichsspannung hinreichend genau möglich ist.

Abschließend wird die Integration von keramischen Bauteilen in eine metallische Systemumgebung näher betrachtet. Die methodische Werkstoffauswahl wird aus Sicht von keramischen Werkstoffen beleuchtet. Es wird gezeigt, dass eine Differenzialbauweise zu einfacheren, kleineren Keramikkomponenten führt. Hierdurch wird eine Spannungsreduzierung im keramischen Bauteil erreicht. Anhand zweier Anwendungsbeispiele wird anschließend gezeigt, dass es zielführend ist, sich durch methodische Lösungsfindungen von der vorhandenen metallischen Geometrie gedanklich zu lösen, um eine keramikgerechtere Lösung für die optimierte Anwendung zu finden.

7.2 Ausblick auf zukünftige Forschungsaktivitäten

In der Literaturrecherche wird deutlich, dass schon viele Untersuchungen zum Risswachstum und zum Bruchverhalten von Keramik vorliegen. Aufgrund der sehr kleinen Spannungsintensitätsfaktoren sind die Risse jedoch sehr kurz, so dass die Untersuchungen fast ausschließlich an kleinen, uniaxial beanspruchten Biegeproben durchgeführt werden. Dabei liegen nur sehr wenige Untersuchungen zum zyklischen Rissfortschritt vor, die meisten Untersuchungen werden quasistatisch durchgeführt. Um den Größeneffekt und den Effekt der zyklischen Beanspruchbarkeit genauer zu bestimmen, ist es von Interesse, gezielt keramische Werkstoff auf verschiedenen Skalenebenen genauer quasistatisch und zyklisch zu untersuchen, so dass Bauteilverhalten und Probenverhalten statisch und zyklisch gegenübergestellt werden können.

Ebenso wichtig wie die Berechenbarkeit von keramischen Strukturbauteilen ist die konstruktive Einbindung der Bauteile in die meist metallische Umgebung. Während die Verbindungstechniken in kalten Anwendungen weitgehend beherrscht werden, bergen die Anwendungen unter Temperatur noch viele Herausforderungen. Werkstofftechnisch spielt die Langzeitstabilität unter zyklischer Beanspruchung und das Thermoschockverhalten eine Rolle, sowohl des eigentlichen Werkstoffs als auch der Verbindung. Konstruktive Herausforderungen sind gestalterische Dehnungskompensation, aber auch die Entwicklung adäquater Berechnungswerkzeuge unter Temperatur und Ermüdung.

Der im letzten Kapitel vorgestellte Stirlingmotor vereint in sich die tribologische, thermische und mechanische Fragestellungen für die konstruktive Auslegung von keramischen Bauteilen. Ein nächster Schritt wird sein, verschiedene Konstruktionslösungen sowie Werkstoffvarianten des Zylinder-Kolben-Systems zu untersuchen und die in dieser Arbeit entwickelten Auslegungsvorschriften anzuwenden und weiter auszubauen.

Anhang

A1 Tabellarische Messergebnisse

Kurzzeit: Spannungsrampe bis zum Bruch

schnell: steile Spannungsrampe $\dot{\sigma}$

langsam: flache Spannungsrampe $\dot{\sigma}$

Wechsel: gleichbleibende zyklische Spannungsamplitude in beide Richtungen tordierend, Bruch (x) nach N Zyklen oder Durchläufer (o)

Schwell: gleichbleibende zyklische Spannungsamplitude in eine Richtung tordierend, Bruch (x) nach N Zyklen oder Durchläufer (o)

oD: ohne zusätzlichen axiale Druckspannung

mD: mit überlagertem statischen axialen Druck

| Al ₂ O ₃ -Versuche | | | | |
|--|---------------------|-----------------------|-------------------|------------------------------|
| Probennummer | Versuchsart | N bei zyklisch | σ_c in MPa | Bruch/ Durchläufer x/o |
| 1 | Kurzzeit oD schnell | - | 411,0 | - |
| 2 | Kurzzeit oD schnell | - | 457,1 | - |
| 3 | Kurzzeit oD schnell | - | 332,7 | - |
| 4 | Kurzzeit oD schnell | - | 388,3 | - |
| 5 | Kurzzeit oD schnell | - | 493,8 | - |
| 6 | Kurzzeit oD schnell | - | 507,1 | - |
| 7 | Kurzzeit oD schnell | - | 472,6 | - |
| 8 | Kurzzeit oD schnell | - | 468,3 | - |
| 9 | Kurzzeit oD schnell | - | 397,5 | - |
| 10 | Kurzzeit oD schnell | - | 355,9 | - |
| 11 | Kurzzeit oD schnell | - | 396,0 | - |
| 12 | Kurzzeit oD schnell | - | 388,4 | - |
| 13 | Kurzzeit oD schnell | - | 421,9 | - |
| 14 | Kurzzeit oD schnell | - | 360,9 | - |
| 15 | Kurzzeit oD schnell | - | 503,7 | - |
| 16 | Kurzzeit oD schnell | - | 339,4 | - |
| 17 | Kurzzeit oD schnell | Bruch ohne Messung | - | - |
| 18 | Kurzzeit oD schnell | - | 347,0 | - |

| Al ₂ O ₃ -Versuche | | | | |
|--|--------------------|-----------------------|-------------------|------------------------------|
| Probennummer | Versuchsart | N bei zyklisch | σ_c in MPa | Bruch/ Durchläufer x/o |
| 19 | KurzzeitoD schnell | Bruch ohne Messung | - | - |
| 20 | KurzzeitoD schnell | Bruch ohne Messung | - | - |
| 21 | KurzzeitoD schnell | - | 418,7 | - |
| 22 | KurzzeitoD schnell | - | 376,6 | - |
| 23 | KurzzeitoD schnell | - | 270,8 | - |
| 24 | KurzzeitoD schnell | - | 407,0 | - |
| 25 | KurzzeitoD schnell | - | 370,7 | - |
| 26 | KurzzeitoD schnell | - | 392,7 | - |
| 27 | KurzzeitoD schnell | - | 357,0 | - |
| 28 | KurzzeitoD schnell | - | 483,3 | - |
| 29 | KurzzeitoD schnell | - | 354,6 | - |
| 30 | KurzzeitoD schnell | - | 364,5 | - |
| 31 | KurzzeitoD schnell | - | 379,5 | - |
| 32 | KurzzeitoD schnell | - | 519,3 | - |
| 33 | KurzzeitoD schnell | - | 501,9 | - |
| 34 | KurzzeitoD schnell | - | 574,2 | - |
| 35 | KurzzeitoD schnell | - | 539,2 | - |
| 36 | KurzzeitoD schnell | - | 578,0 | - |
| 37 | KurzzeitoD schnell | - | 492,6 | - |
| 38 | KurzzeitoD schnell | - | 569,8 | - |
| 39 | KurzzeitoD schnell | - | 479,5 | - |
| 40 | KurzzeitoD schnell | - | 306,8 | - |
| 41 | KurzzeitoD schnell | - | 587,0 | - |
| 42 | KurzzeitoD schnell | - | 466,5 | - |
| 43 | KurzzeitoD schnell | - | 376,8 | - |
| 44 | KurzzeitoD schnell | - | 482,4 | - |
| 45 | KurzzeitoD schnell | - | 453,6 | - |
| 46 | KurzzeitoD schnell | - | 513,2 | - |
| 47 | KurzzeitoD schnell | - | 586,2 | - |
| 48 | KurzzeitoD schnell | - | 339,7 | - |
| 49 | KurzzeitoD schnell | - | 587,7 | - |
| 50 | KurzzeitoD schnell | - | 370,3 | - |
| 51 | KurzzeitoD schnell | - | 555,3 | - |
| 52 | KurzzeitoD schnell | - | 516,6 | - |
| 53 | KurzzeitoD schnell | - | 493,8 | - |
| 54 | KurzzeitoD schnell | - | 512,0 | - |

| Al ₂ O ₃ -Versuche | | | | |
|--|--------------------|-----------------------|-------------------|------------------------------|
| Probennummer | Versuchsart | N bei zyklisch | σ_c in MPa | Bruch/ Durchläufer x/o |
| 55 | KurzzeitD schnell | - | 617,1 | - |
| 56 | KurzzeitD schnell | Bruch ohne Messung | - | - |
| 57 | KurzzeitmD schnell | - | 442,0 | - |
| 58 | KurzzeitmD schnell | - | 471,8 | - |
| 59 | KurzzeitmD schnell | - | 481,8 | - |
| 60 | KurzzeitmD schnell | - | 441,8 | - |
| 61 | KurzzeitmD schnell | - | 481,8 | - |
| 62 | KurzzeitmD schnell | - | 445,4 | - |
| 63 | KurzzeitmD schnell | - | 519,8 | - |
| 64 | WechselD | 1.093.005 | 213,9 | x |
| 65 | WechselD | 25.265 | 213,9 | x |
| 66 | WechselD | 364.870 | 182,8 | x |
| 67 | WechselD | 2.945.125 | 150,5 | o |
| 68 | WechselD | 719.630 | 188,1 | x |
| 69 | WechselD | 3.009.305 | 164,3 | o |
| 70 | WechselD | 452.045 | 182,8 | x |
| 71 | WechselD | 384.065 | 164,3 | x |
| 72 | WechselD | 3.061.445 | 150,5 | o |
| 73 | WechselD | 3.016.400 | 164,3 | o |
| 74 | WechselD | 3.049.365 | 182,8 | o |
| 75 | WechselD | 102.380 | 202,0 | x |
| 76 | WechselD | Bruch ohne Messung | - | - |
| 77 | WechselD | 652.755 | 188,1 | x |
| 78 | WechselD | Bruch ohne Messung | - | - |
| 79 | WechselmD | 788.095 | 171,9 | x |
| 80 | WechselmD | 5.211.740 | 160,2 | o |
| 81 | WechselmD | 2.076.270 | 171,9 | x |
| 82 | WechselmD | 168.265 | 187,6 | x |
| 83 | WechselmD | 2.592.650 | 171,9 | o |
| 84 | WechselmD | 34.470 | 187,6 | x |
| 85 | WechselmD | 2.903.590 | 171,9 | o |
| 86 | WechselmD | 850.980 | 187,6 | x |
| 87 | WechselmD | 2.116.850 | 171,9 | o |
| 88 | WechselmD | 90.000 | 187,6 | x |
| 89 | WechselmD | 2.589.525 | 178,5 | o |

| Al₂O₃-Versuche | | | | |
|---|--------------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| Probennummer | Versuchsart | N bei zyklisch | σ_c in MPa | Bruch/ Durchläufer x/o |
| 90 | WechselmD | 7.245 | 192,8 | x |
| 91 | WechselmD | 2.089.790 | 178,5 | o |
| 92 | WechselmD | Bruch ohne Messung | - | - |
| 93 | SchwelloD | 1.041.490 | 205,1 | o |
| 93b | SchwelloD | 12.823 | 214,3 | x |
| 94 | SchwelloD | 9.498 | 205,8 | x |
| 95 | SchwelloD | 1.290.588 | 198,1 | o |
| 96 | SchwelloD | 8.128 | 204,8 | x |
| 97 | SchwelloD | 83.863 | 198,5 | o |
| 98 | SchwelloD | 259.475 | 205,0 | o |
| 98b | SchwelloD | 18.005 | 205,2 | x |
| 99 | SchwelloD | 293.738 | 198,9 | x |
| 100 | SchwelloD | 634.458 | 190,2 | x |
| 101 | SchwelloD | 300 | 183,2 | x |
| 102 | SchwelloD | 1.295.788 | 183,0 | o |
| 103 | SchwelloD | 1.291.018 | 191,1 | o |
| 104 | SchwelloD | 1.506.260 | 199,8 | o |
| 105 | SchwelloD | 16.540 | 205,6 | x |
| 106 | SchwelloD | 1.295.368 | 198,5 | o |
| 107 | WechseloD | 2.675.465 | 172,0 | o |
| 108 | WechseloD | keine Messung | - | - |
| 109 | WechseloD | 462.500 | 172,0 | x |
| 110 | SchwelloD | 210.120 | 149,7 | o |
| 110b | SchwelloD | 245.473 | 157,4 | o |
| 110c | SchwelloD | 226.413 | 162,9 | o |
| 111 | SchwelloD | 39.020 | 182,5 | o |
| 111b | SchwelloD | 610.375 | 188,9 | o |
| 111c | SchwelloD | 1.495.118 | 196,0 | o |
| 112 | SchwelloD | 9.135 | 195,0 | x |
| 113 | SchwelloD | Bruch ohne Messung | - | - |
| 113b | SchwelloD | 1.502.968 | 189,2 | o |
| 114 | SchwelloD | 195.950 | 195,5 | o |
| 114b | SchwelloD | 395.350 | 202,6 | o |
| 114c | SchwelloD | 535.500 | 215,2 | x |
| 115 | SchwelloD | 1.488.298 | 196,5 | o |
| 116 | SchwelloD | 15.768 | 202,2 | x |

| Al₂O₃-Versuche | | | | |
|---|--------------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| Probennummer | Versuchsart | N bei zyklisch | σ_c in MPa | Bruch/ Durchläufer x/o |
| 117 | SchwellmD | 1.281.990 | 193,4 | o |
| 118 | SchwellmD | 673 | 202,5 | o |
| 118b | SchwellmD | 1.297.968 | 202,6 | o |
| 119 | SchwellmD | Bruch ohne Messung | - | - |
| 120 | SchwelloD | 185 | 208,5 | x |
| 121 | SchwellmD | 1.491.618 | 208,9 | o |
| 122 | SchwellmD | 5.345 | 215,1 | o |
| 122b | SchwellmD | 1.076.888 | 216,6 | o |
| 123 | SchwellmD | Bruch ohne Messung | - | - |
| 124 | SchwellmD | 484.775 | 221,9 | x |
| 125 | SchwellmD | 1.512.023 | 215,2 | o |
| 126 | SchwellmD | 1.449.000 | 221,2 | o |
| 127 | SchwellmD | 266.165 | 228,2 | o |
| 127b | SchwellmD | 1.210.750 | 228,1 | o |
| 128 | SchwellmD | 2.155 | 235,8 | x |
| 129 | SchwellmD | 2.992.745 | 229,2 | o |
| 130 | SchwellmD | Bruch ohne Messung | - | - |
| 131 | SchwellmD | 1.503.600 | 235,2 | o |
| 132 | SchwellmD | 565 | 240,9 | o |
| 132b | SchwellmD | 1.285.263 | 241,4 | o |
| 133 | SchwellmD | 9.035 | 248,4 | x |
| 134 | SchwellmD | 1.481.888 | 241,9 | o |
| 135 | SchwellmD | 1.327.763 | 248,1 | o |
| 136 | WechselmD | 77.380 | 184,7 | x |
| 137 | WechselmD | 453.065 | 184,7 | x |
| 138 | WechselmD | 137.903 | 184,1 | x |
| 139 | WechselmD | 2.728 | 185,5 | o |
| 139b | WechselmD | 778 | - | o |
| 139c | WechselmD | 1.271.228 | 184,9 | o |
| 140 | WechselmD | 1.365.098 | 183,0 | o |
| 141 | ZeitfestWoD | 2.730 | 229,0 | x |
| 142 | ZeitfestWoD | 31.533 | 230,8 | x |
| 143 | ZeitfestWoD | 45.973 | 230,8 | x |
| 144 | ZeitfestWoD | 4.465 | 230,9 | x |
| 145 | ZeitfestWoD | Bruch ohne | - | - |

| Al₂O₃-Versuche | | | | |
|---|--------------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| Probennummer | Versuchsart | N bei zyklisch | σ_c in MPa | Bruch/ Durchläufer x/o |
| | | Messung | | |
| 146 | ZeitfestWoD | 363 | 228,8 | x |
| 147 | ZeitfestWoD | 11.548 | 229,1 | x |
| 148 | ZeitfestWoD | 1.913 | 229,0 | x |
| 149 | ZeitfestWoD | 950 | 231,2 | x |
| 150 | ZeitfestWoD | 6.058 | 229,8 | x |
| 151 | ZeitfestWoD | 3.543 | 230,7 | x |
| 152 | ZeitfestWoD | 493 | 230,9 | x |
| 153 | ZeitfestWoD | 2.275 | 230,6 | x |
| 154 | ZeitfestWoD | 14.763 | 230,0 | x |
| 155 | ZeitfestWoD | 2.403 | 231,7 | x |
| 156 | ZeitfestWoD | 1.850 | 236,0 | x |
| 157d | ZeitfestWmD | 344.125 | 230,1 | x |
| 158 | ZeitfestWmD | 8.590 | 229,0 | x |
| 159 | ZeitfestWmD | 6.760 | 229,1 | x |
| 160 | ZeitfestWmD | 6.955 | 229,9 | x |
| 161 | ZeitfestWmD | 950 | 228,7 | x |
| 162 | ZeitfestWmD | 5.260 | 229,2 | x |
| 163 | ZeitfestWmD | 4.295 | 229,6 | x |
| 164 | ZeitfestWmD | 121.950 | 229,6 | x |
| 165 | ZeitfestWmD | 2.925 | 228,5 | x |
| 166 | ZeitfestWmD | 20.333 | 228,4 | x |
| 167b | ZeitfestWmD | 12.293 | 241,7 | x |
| 168 | ZeitfestWmD | 30 | 243,9 | x |
| 169 | ZeitfestWmD | 1.348 | 244,4 | x |
| 170 | ZeitfestWmD | 145 | 241,8 | x |
| 171 | ZeitfestWmD | 1.148 | 234,8 | x |
| 172 | ZeitfestWmD | 14.218 | 234,7 | x |
| 173 | ZeitfestWmD | 5.825 | 234,2 | x |
| 174 | ZeitfestWmD | 1.908 | 234,6 | x |
| 175 | ZeitfestWmD | 3.813 | 234,7 | x |
| 176 | ZeitfestWmD | 1.953 | 234,3 | x |
| 177 | ZeitfestWmD | 51.455 | 236,4 | x |
| 178 | ZeitfestWmD | 5.885 | 235,9 | x |
| 179 | ZeitfestWmD | 5.305 | 234,8 | x |
| 180 | ZeitfestWmD | 8.015 | 235,4 | x |
| 181 | ZeitfestWmD | 4.748 | 241,6 | x |
| 182 | ZeitfestWmD | 863 | 241,3 | x |

| Al₂O₃-Versuche | | | | |
|---|--------------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| Probennummer | Versuchsart | N bei zyklisch | σ_c in MPa | Bruch/ Durchläufer x/o |
| 183 | ZeitfestWmD | 34.718 | 241,9 | x |
| 184 | ZeitfestWmD | 518 | 241,4 | x |
| 185 | ZeitfestWmD | 8.005 | 242,0 | x |
| 186 | ZeitfestWmD | 365 | 241,5 | x |
| 187 | ZeitfestWoD | 653 | 245,6 | x |
| 188 | ZeitfestWoD | 840 | 245,9 | x |
| 189 | ZeitfestWoD | 105 | 158,2 | x |
| 190 | ZeitfestWoD | 1.860 | 245,0 | x |
| 191 | ZeitfestWoD | 178 | 245,9 | x |
| 192 | ZeitfestWoD | 628 | 251,3 | x |
| 193 | ZeitfestWoD | 6.155 | 244,8 | x |
| 194 | ZeitfestWoD | 5.038 | 245,1 | x |
| 195 | ZeitfestWoD | 620 | 247,1 | x |
| 196 | keine Messung | - | - | - |
| 196b | ZeitfestWoD | 28 | 245,5 | x |
| 197 | KurzzeitD langsam | - | 249,8 | - |
| 198 | KurzzeitD langsam | - | 284,5 | - |
| 199 | KurzzeitD langsam | - | 300,7 | - |
| 200 | KurzzeitD langsam | - | 249,6 | - |
| 201 | KurzzeitD langsam | - | 266,5 | - |
| 202 | KurzzeitD langsam | - | 281,8 | - |
| 203 | KurzzeitD langsam | - | 296,4 | - |
| 204 | KurzzeitD langsam | - | 236,5 | - |
| 205 | KurzzeitD langsam | - | 270,3 | - |
| 206 | ZeitfestWoD | 343 | 265,0 | x |
| 207 | ZeitfestWoD | 1.725 | 263,7 | x |
| 208 | ZeitfestWoD | 1.593 | 265,3 | x |
| 209 | ZeitfestWoD | 110 | 265,2 | x |
| 210 | ZeitfestWoD | 1.173 | 265,4 | x |
| 211 | ZeitfestWoD | 285 | 265,1 | x |
| 212 | ZeitfestWoD | 40 | 266,1 | x |
| 213 | ZeitfestWoD | 28 | 264,1 | x |
| 214 | ZeitfestWoD | 183 | 265,0 | x |
| 215 | ZeitfestWoD | - | - | - |
| 216 | ZeitfestWoD | 275 | 264,9 | x |
| 217 | ZeitfestWoD | 825 | 264,6 | x |
| 218 | ZeitfestWmD | 845 | 254,8 | x |
| 219 | ZeitfestWmD | 253 | 262,8 | x |

| Al₂O₃-Versuche | | | | |
|---|--------------------|-----------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| Probennummer | Versuchsart | N bei zyklisch | σ_c in MPa | Bruch/ Durchläufer x/o |
| 220 | ZeitfestWmD | 1.963 | 261,6 | x |
| 221 | ZeitfestWmD | 218 | 262,2 | x |
| 222 | ZeitfestWmD | 1.380 | 262,7 | x |
| 223 | ZeitfestWmD | 15.045 | 262,5 | x |
| 224 | ZeitfestWmD | 118 | 265,2 | x |
| 225 | ZeitfestWmD | 705 | 263,8 | x |
| 226 | ZeitfestWmD | 8.188 | 262,9 | x |
| 227 | KurzzeitmD langsam | - | 0,0 | - |
| 228 | KurzzeitmD langsam | - | 284,8 | - |
| 229 | KurzzeitmD langsam | - | 245,9 | - |
| 230 | KurzzeitmD langsam | - | 248,2 | - |
| 231 | KurzzeitmD langsam | - | 304,2 | - |
| 232 | KurzzeitmD langsam | - | 329,1 | - |
| 233 | KurzzeitmD langsam | - | 338,6 | - |
| 234 | KurzzeitmD langsam | - | 317,2 | - |
| 235 | KurzzeitmD langsam | - | 368,6 | - |
| 236 | KurzzeitmD langsam | - | 291,7 | - |

| SiC-Versuche | | | | |
|--------------|--------------------|---------------------|-------------------|------------------------------|
| Probennummer | Versuchsart | N bei zyklisch | σ_c in MPa | Bruch/ Durchläufer x/o |
| 1 | KurzzeitoD schnell | | 499,92 | |
| 2 | KurzzeitoD schnell | | 373,21 | |
| 3 | KurzzeitoD schnell | | 749,50 | |
| 4 | KurzzeitoD schnell | | 652,74 | |
| 5 | KurzzeitoD schnell | | 411,61 | |
| 6 | KurzzeitoD schnell | Bruch bei Einbau | 0,00 | |
| 7 | WechseloD | 97.500 | 319,46 | x |
| 8 | WechseloD | 864.000 | 314,08 | o |
| 9 | WechseloD | 169.323 | 324,83 | x |
| 10 | WechseloD | 10.005 | 314,85 | x |
| 11 | WechseloD | 597.635 | 306,40 | o |
| 12 | WechseloD | 165.848 | 316,39 | x |
| 13 | WechseloD | Bruch beim Anfahren | - | x |
| 14 | WechseloD | 462.625 | 307,17 | x |
| 15 | WechseloD | 37.190 | 297,96 | x |
| 16 | WechseloD | 174.985 | 291,81 | x |
| 17 | WechseloD | 676.810 | 284,13 | o |
| 18 | WechseloD | 125.248 | 291,81 | x |
| 19 | WechseloD | 684.535 | 291,81 | o |
| 20 | WechseloD | 125.115 | 299,49 | x |
| 21 | WechseloD | Bruch beim Anfahren | - | x |
| 22 | WechseloD | 418.025 | 292,58 | x |
| 23 | WechselmD | 578.693 | 261,48 | o |
| 23b | WechselmD | 449.790 | 273,90 | o |
| 24b | WechselmD | 180.000 | 294,17 | o |
| 24c | WechselmD | 864.000 | 300,70 | o |
| 25 | WechselmD | 54.000 | 313,78 | o |
| 25b | WechselmD | 162.000 | 320,31 | o |
| 25c | WechselmD | 13.500 | 326,85 | o |
| 25d | WechselmD | 27.000 | 326,85 | o |
| 25e | WechselmD | 1.251.000 | 326,85 | o |
| 26 | WechselmD | Bruch bei Einbau | 339,93 | x |
| 27 | WechselmD | 22.500 | 339,93 | o |
| 27b | WechselmD | 171.000 | 346,46 | o |

| SiC-Versuche | | | | |
|--------------|-------------------|-----------------------|-------------------|------------------------------|
| Probennummer | Versuchsart | N bei zyklisch | σ_c in MPa | Bruch/ Durchläufer x/o |
| 27c | WechselmD | 27.000 | 359,54 | o |
| 27d | WechselmD | 189.000 | 366,07 | o |
| 27e | WechselmD | 216.000 | 379,15 | o |
| 27f | WechselmD | 45.000 | 392,22 | o |
| 28 | WechselmD | Bruch beim Anfahren | - | - |
| 29 | WechselmD | Bruch beim Anfahren | - | - |
| 30 | WechselmD | 756.000 | 343,19 | o |
| 30b | WechselmD | 756.000 | 359,54 | o |
| 31 | WechselmD | 30 | 375,88 | x |
| 32 | WechselmD | Bruch bei Einbau | 0,00 | |
| 33 | WechselmD | 846.000 | 359,54 | o |
| 34 | WechselmD | 648.000 | 366,07 | o |
| 35 | WechselmD | Bruch bei Hochfahren | - | |
| 36 | WechselmD | 450 | 372,61 | x |
| 37 | WechselmD | Bruch bei Hochfahren | - | |
| 38 | WechselmD | 30 | 326,85 | x |
| 39 | WechselmD | 30 | 326,85 | x |
| 40 | WechselmD | 864.000 | 326,85 | o |
| 41 | WechselmD | 2.100 | 343,19 | x |
| 42 | KurzzeitoDschnell | | 479,96 | |
| 43 | KurzzeitoDschnell | | 286,44 | |
| 44 | KurzzeitoDschnell | | 410,08 | |
| 45 | KurzzeitoDschnell | | 307,94 | |
| 46 | KurzzeitoDschnell | | 323,30 | |
| 47 | KurzzeitoDschnell | | 191,98 | |
| 48 | WechselmD | Bruch bei Einbau | - | |
| 49 | WechselmD | Bruch bei Einbau | - | |
| 50 | WechselmD | Bruch beim Anschalten | - | |
| 51 | WechselmD | 10 | 326,85 | x |
| 52 | WechselmD | 828.000 | 326,85 | o |
| 53 | WechselmD | Bruch beim Anfahren | | x |
| 54 | WechselmD | Bruch beim Anfahren | | x |
| 55 | WechselmD | 603.000 | 310,51 | o |
| 56 | | Bruch bei Einbau | | |

| SiC-Versuche | | | | |
|--------------|--------------------|---------------------|-------------------|------------------------------|
| Probennummer | Versuchsart | N bei zyklisch | σ_c in MPa | Bruch/ Durchläufer x/o |
| 57 | WechseloD | 450.000 | 299,49 | o |
| 58 | WechseloD | 200 | 307,17 | x |
| 59 | WechseloD | 864.000 | 299,49 | o |
| 60 | WechseloD | - | 276,46 | x |
| 61 | WechseloD | | 276,46 | x |
| 62 | WechseloD | 9.900 | 307,17 | x |
| 63 | WechseloD | 612.000 | 284,13 | o |
| 64 | WechseloD | 1.080.000 | 291,81 | o |
| 65 | WechseloD | 3.150 | 284,13 | x |
| 66 | WechseloD | 603.000 | 284,13 | o |
| 67 | WechseloD | | 299,49 | o |
| 68 | WechseloD | 234.000 | 307,17 | x |
| 69 | WechseloD | 19.440.000 | 299,49 | o |
| 70 | WechseloD | Bruch beim Anfahren | 276,46 | x |
| 71 | WechseloD | 648.000 | 307,17 | x |
| 72 | WechseloD | Bruch beim Anfahren | 276,46 | x |
| 73 | WechseloD | 450.000 | 314,85 | o |
| 74 | WechseloD | 429.750 | 322,53 | x |
| 75 | WechseloD | 57.600 | 314,85 | x |
| 76 | WechselmD | 1.080.000 | 343,19 | o |
| 77 | WechselmD | 10 | 343,19 | x |
| 78 | WechselmD | 3.015.000 | 343,19 | o |
| 79 | WechselmD | 648.000 | 310,51 | o |
| 80 | WechselmD | Bruch beim Anfahren | 372,61 | x |
| 81 | WechselmD | 650.000 | 375,88 | o |
| 82 | KurzzeitoD schnell | | 324,07 | |
| 83 | KurzzeitoD schnell | | 360,16 | |
| 84 | KurzzeitoD schnell | | 355,55 | |
| 85 | KurzzeitoD schnell | | 421,59 | |
| 86 | Bruch bei Einbau | | 0,00 | |
| 87 | KurzzeitoD schnell | | 319,46 | |
| 88 | KurzzeitoD schnell | | 305,64 | |
| 89 | KurzzeitoD schnell | | 340,19 | |
| 90 | KurzzeitoD schnell | | 335,59 | |

| SiC-Versuche | | | | |
|--------------|--------------------|----------------|-------------------|------------------------------|
| Probennummer | Versuchsart | N bei zyklisch | σ_c in MPa | Bruch/ Durchläufer x/o |
| 91 | KurzzeitD schnell | | 248,81 | |
| 92 | KurzzeitD schnell | | 380,13 | |
| 93 | KurzzeitD schnell | | 377,82 | |
| 94 | KurzzeitD schnell | | 371,68 | |
| 95 | KurzzeitD schnell | | 334,05 | |
| 96 | KurzzeitD schnell | | 336,35 | |
| 97 | KurzzeitD schnell | | 324,07 | |
| 98 | KurzzeitD schnell | | 337,12 | |
| 99 | KurzzeitD schnell | | 340,96 | |
| 100 | KurzzeitD schnell | | 241,90 | |
| 101 | KurzzeitD schnell | | 383,20 | |
| 102 | KurzzeitD schnell | | 312,55 | |
| 103 | Bruch bei Einbau | | - | - |
| 104 | KurzzeitmD schnell | | 521,65 | |
| 105 | KurzzeitmD schnell | | 400,07 | |
| 106 | KurzzeitmD schnell | | 271,29 | |
| 107 | KurzzeitmD schnell | | 241,87 | |
| 108 | KurzzeitmD schnell | | 259,52 | |
| 109 | KurzzeitmD schnell | | 294,82 | |
| 110 | KurzzeitmD schnell | | 314,43 | |
| 111 | KurzzeitmD schnell | | 270,63 | |
| 112 | KurzzeitmD schnell | | 392,22 | |
| 113 | KurzzeitmD schnell | | 608,60 | |
| 114 | KurzzeitmD schnell | | 502,04 | |
| 115 | KurzzeitmD schnell | | 496,81 | |
| 116 | KurzzeitmD schnell | | 390,26 | |
| 117 | KurzzeitmD schnell | | 353,00 | |
| 118 | KurzzeitmD schnell | | 251,02 | |
| 119 | KurzzeitmD schnell | | 551,07 | |
| 120 | KurzzeitmD schnell | | 98,06 | |
| 121 | KurzzeitmD schnell | | 481,13 | |
| 122 | KurzzeitmD schnell | | 579,18 | |
| 123 | KurzzeitmD schnell | | 447,79 | |
| 125 | Bruch bei Einbau | | 0,00 | |

| SiC-Versuche | | | | |
|--------------|--------------------|-----------------------|-------------------|------------------------------|
| Probennummer | Versuchsart | N bei zyklisch | σ_c in MPa | Bruch/ Durchläufer x/o |
| 126 | KurzzeitmD schnell | | 411,83 | |
| 127 | KurzzeitmD schnell | | 325,54 | |
| 128 | KurzzeitmD schnell | hoher Versatz bei Fax | - | |
| 129 | KurzzeitmD schnell | | 464,13 | |
| 130 | KurzzeitmD schnell | | 396,14 | |
| 131 | KurzzeitmD schnell | | 392,88 | |
| 132 | KurzzeitmD schnell | Bruch bei Einbau | - | |
| 133 | KurzzeitmD schnell | Bruch bei Einbau | - | |
| 134 | WechselmD | | 392,22 | x |
| 135 | WechselmD | Bruch bei Einbau | - | - |
| 136 | WechselmD | Bruch bei Einschalten | - | - |
| 137 | WechselmD | | 375,88 | o |
| 138 | WechselmD | Bruch bei Einbau | - | - |
| 139 | WechselmD | Bruch bei Einbau | - | - |
| 140 | WechselmD | | 375,88 | x |
| 141 | WechselmD | Bruch beim Hochfahren | 320,31 | x |
| 142 | WechselmD | | 359,54 | x |
| 143 | WechselmD | Bruch bei Einbau | - | - |
| 144 | WechselmD | Bruch bei Einbau | - | - |
| 145 | KurzzeitD langsam | | 301,80 | |
| 146 | KurzzeitD langsam | | 395,48 | |
| 147 | KurzzeitD langsam | | 364,00 | |
| 148 | KurzzeitD langsam | | 345,57 | |
| 149 | KurzzeitD langsam | | 350,94 | |
| 150 | KurzzeitD langsam | | 369,37 | |
| 151 | KurzzeitD langsam | | 377,82 | |
| 152 | KurzzeitD langsam | | 425,43 | |
| 153 | KurzzeitD langsam | | 268,78 | |
| 154 | KurzzeitD langsam | | 329,44 | |
| 155 | KurzzeitD langsam | | 535,25 | |
| 156 | KurzzeitD langsam | | 354,02 | |
| 157 | KurzzeitD langsam | | 380,13 | |
| 158 | KurzzeitD langsam | | 211,95 | |
| 159 | KurzzeitD langsam | | 327,91 | |

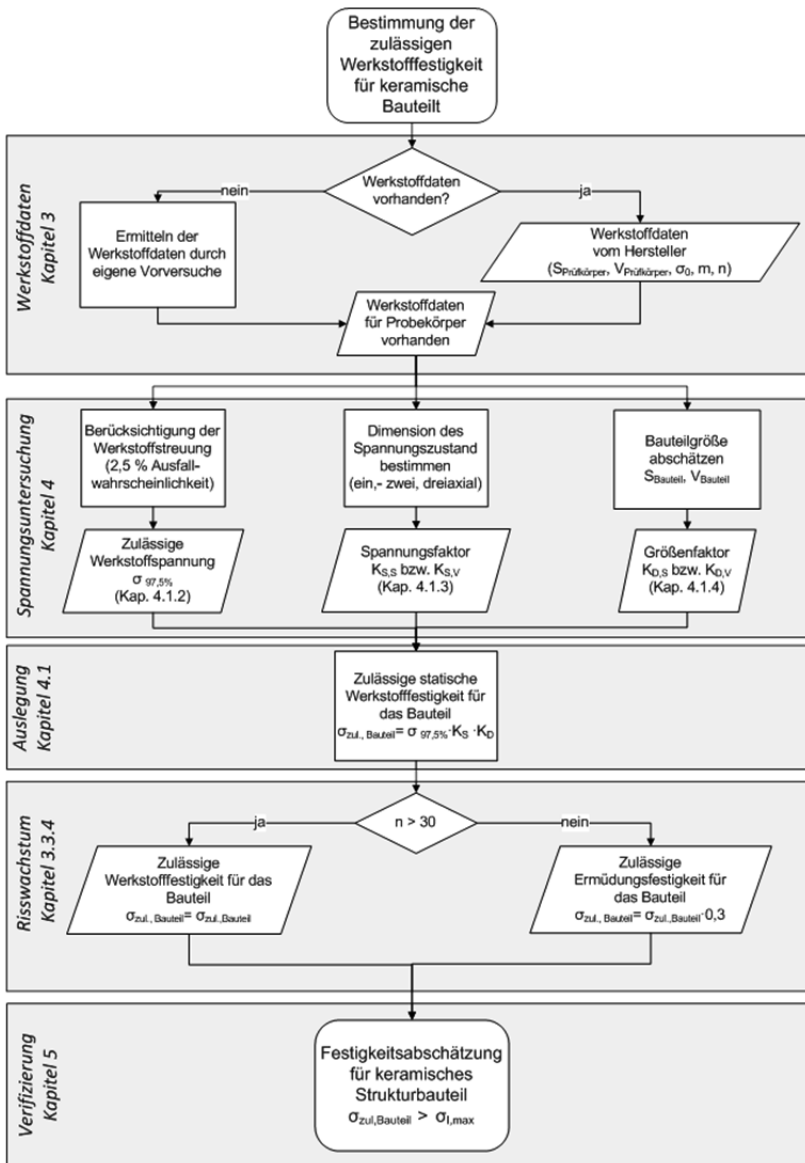
| SiC-Versuche | | | | |
|--------------|--------------------|-----------------------|-------------------|------------------------------|
| Probennummer | Versuchsart | N bei zyklisch | σ_c in MPa | Bruch/ Durchläufer x/o |
| 160 | KurzzeitmD langsam | | 269,98 | |
| 161 | KurzzeitmD langsam | | 384,38 | |
| 162 | KurzzeitmD langsam | | 584,41 | |
| 163 | KurzzeitmD langsam | | 558,26 | |
| 164 | KurzzeitmD langsam | Bruch bei Einbau | 0,00 | |
| 165 | KurzzeitmD langsam | | 405,30 | |
| 166 | KurzzeitmD langsam | | 442,56 | |
| 167 | KurzzeitmD langsam | | 362,15 | |
| 168 | KurzzeitmD langsam | | 249,06 | |
| 169 | KurzzeitmD langsam | | 375,88 | |
| 170 | KurzzeitmD langsam | | 389,61 | |
| 171 | KurzzeitmD langsam | | 403,33 | |
| 172 | KurzzeitmD langsam | | 285,01 | |
| 173 | KurzzeitmD langsam | | 710,57 | |
| 174 | KurzzeitmD langsam | | 276,52 | |
| 175 | KurzzeitmD langsam | Bruch bei Einbau | 0,00 | |
| 176 | KurzzeitmD langsam | | 413,79 | |
| 177 | SchwelloD | 843.700 | 264,75 | o |
| 178 | SchwelloD | 627.250 | 271,94 | o |
| 179 | SchwelloD | 706.940 | 271,94 | x |
| 180 | SchwelloD | 859.640 | 276,52 | o |
| 181 | SchwelloD | Bruch beim Hochfahren | 276,52 | x |
| 182 | SchwelloD | 848.480 | 278,48 | o |
| 183 | SchwelloD | 37.267 | 284,36 | o |
| 183b | SchwelloD | 1.124.855 | 284,36 | o |
| 184 | SchwelloD | Bruch beim Hochfahren | 102,63 | x |
| 185 | SchwelloD | Bruch beim Anschalten | - | - |
| 186 | SchwelloD | Bruch beim Anschalten | - | - |
| 187 | SchwelloD | Bruch beim Hochfahren | 263,44 | x |
| 188 | SchwelloD | 72.467 | 256,25 | o |
| 188b | SchwelloD | 540.000 | 256,25 | o |
| 190 | SchwelloD | 325.000 | 263,44 | o |
| 189 | SchwelloD | 648.000 | 271,29 | o |
| 191 | SchwelloD | 673.690 | 277,82 | o |

| SiC-Versuche | | | | |
|--------------|-------------|-----------------------------|-------------------|------------------------------|
| Probennummer | Versuchsart | N bei zyklisch | σ_c in MPa | Bruch/ Durchläufer x/o |
| 192 | SchwelloD | 214.240 | 285,47 | o |
| 192b | SchwelloD | 483.833 | 285,67 | o |
| 193 | SchwelloD | 2.336 | 285,67 | x |
| 194 | SchwelloD | 866.690 | 283,05 | o |
| 195 | SchwelloD | 683.600 | 290,24 | o |
| 196 | SchwelloD | 20 | 266,06 | x |
| 197 | SchwelloD | 1.088.300 | 268,02 | o |
| 197b | SchwelloD | 641.025 | 274,56 | o |
| 198 | SchwelloD | 190 | 281,09 | x |
| 199 | SchwelloD | 1 | 264,75 | x |
| 200 | SchwelloD | 2.328.495 | 268,02 | o |
| 201 | SchwelloD | 677.000 | 276,52 | o |
| 202 | SchwellmD | 641.895 | 426,20 | o |
| 203 | SchwellmD | Bruch beim Hochfahren | 440,79 | x |
| 204 | SchwellmD | 16.378 | 441,56 | x |
| 205 | SchwellmD | 855.280 | 423,90 | o |
| 206 | SchwellmD | 861.460 | 446,17 | o |
| 207 | SchwellmD | 1.298.355 | 463,83 | o |
| 208 | SchwellmD | 8.250 | 479,96 | o |
| 208b | SchwellmD | 825.090 | 484,56 | o |
| 209 | SchwellmD | 708.115 | 501,46 | o |
| 210 | SchwellmD | 1.256.000 | 522,19 | o |
| 211 | SchwellmD | Bruch beim Hochfahren | 403,16 | x |
| 212 | SchwellmD | 80 | 539,86 | x |
| 213 | SchwellmD | N=20; Bruch beim Hochfahren | 518,35 | x |
| 214 | SchwellmD | N=5; Bruch beim Hochfahren | 489,94 | x |
| 215 | SchwellmD | 88 | 499,16 | x |
| 216 | SchwellmD | 1 | 342,50 | x |
| 217 | SchwellmD | 827.800 | 481,49 | o |
| 218 | SchwellmD | 1 | 433,11 | x |
| 219 | SchwellmD | 640.210 | 502,23 | o |
| 220 | SchwellmD | 60 | 516,82 | x |

| SiC-Versuche | | | | |
|--------------|--------------------|-----------------------|-------------------|------------------------------|
| Probennummer | Versuchsart | N bei zyklisch | σ_c in MPa | Bruch/ Durchläufer x/o |
| 221 | SchwellmD | 20 | 463,83 | x |
| 222 | SchwellmD | 639.649 | 499,92 | o |
| 223 | SchwellmD | 1 | 391,64 | x |
| 224 | SchwellmD | 868.955 | 519,89 | o |
| 225 | SchwellmD | 852.520 | 540,62 | o |
| 226 | SchwellmD | 250 | 556,75 | x |
| 227 | SchwellmD | Bruch beim Hochfahren | 447,70 | x |
| 228 | SchwellmD | Bruch beim Hochfahren | 516,82 | x |
| 229 | SchwellmD | 88 | 539,86 | x |
| 230 | SchwellmD | Bruch beim Hochfahren | 457,69 | x |
| 231 | SchwellmD | Bruch beim Hochfahren | 422,36 | x |
| 232 | KurzzeitmD langsam | Bruch beim Einspannen | - | - |
| 233 | KurzzeitmD langsam | - | 338,55 | - |
| 234 | KurzzeitmD langsam | - | 317,18 | - |
| 235 | KurzzeitmD langsam | - | 368,62 | - |
| 236 | KurzzeitmD langsam | - | 291,68 | - |

| ZrO ₂ -Versuche | | | | |
|----------------------------|--------------------|-----------------|-------------------|------------------------------|
| Probennummer | Versuchsart | N bei zyklisch | σ_c in MPa | Bruch/ Durchläufer x/o |
| 1 | KurzzeitOD schnell | - | 595,61 | - |
| 2 | KurzzeitOD schnell | - | 627,02 | - |
| 3 | KurzzeitOD schnell | - | 555,98 | - |
| 4 | KurzzeitOD schnell | - | 484,64 | - |
| 5 | KurzzeitOD schnell | - | 498,31 | - |
| 6 | KurzzeitOD schnell | - | 501,15 | - |
| 7 | KurzzeitOD schnell | - | 487,64 | - |
| 8 | KurzzeitOD schnell | - | 492,63 | - |
| 9 | KurzzeitOD schnell | - | 487,64 | - |
| 10 | KurzzeitOD schnell | - | 498,31 | - |
| 11 | KurzzeitOD schnell | - | 506,99 | - |
| 12 | KurzzeitOD schnell | - | 573,57 | - |
| 13 | KurzzeitMD schnell | - | 655,53 | - |
| 14 | KurzzeitMD schnell | - | 654,75 | - |
| 15 | KurzzeitMD schnell | - | 660,11 | - |
| 16 | Bruch-ohne-Messung | - | 566,30 | - |
| 17 | KurzzeitMD schnell | - | 599,97 | - |
| 18 | KurzzeitMD schnell | - | 594,15 | - |
| 19 | KurzzeitMD schnell | - | 459,36 | - |
| 20 | KurzzeitMD schnell | - | 536,76 | - |
| 21 | KurzzeitMD schnell | - | 572,32 | - |
| 22 | KurzzeitMD schnell | ohne Messwerte! | | - |
| 23 | KurzzeitMD schnell | - | 577,15 | - |
| 24 | KurzzeitMD schnell | - | 622,46 | - |
| 25 | KurzzeitMD schnell | - | 569,83 | - |
| 26 | WechselOD | 22.620 | 359,54 | x |
| 27 | WechselOD | beim Hochfahren | 359,54 | x |
| 28 | WechselOD | 310 | 359,54 | x |
| 29 | WechselOD | 86.400 | 359,54 | x |

A2 Auslegungsvorschrift



Auslegungsvorschrift zur Ermittlung der zulässigen Bauteilspannung $\sigma_{zul,Bauteil}$ für keramische Werkstoffe

Bei der mechanischen Auslegung eines Bauteils muss die zulässige Werkstofffestigkeit des Bauteils $\sigma_{zul,Bauteil}$ größer sein, als die größte Vergleichsspannung im Bauteil $\sigma_{eq,Bauteil}$.

$$\sigma_{zul,Bauteil} > \sigma_{vergl,Bauteil}$$

1. Ermittlung der Vergleichsspannung $\sigma_{eq,Bauteil}$

Die Vergleichsspannung des Bauteils kann analytisch oder numerisch mit Hilfe von FEM ermittelt werden. Als Vergleichsspannung ist die maximale 1. Hauptnormalspannung zu wählen.

$$\sigma_{vergl,Bauteil} = \sigma_{I,max,Bauteil}$$

2. Ermittlung der zulässigen Bauteilspannung $\sigma_{zul,Bauteil}$

Der zulässige Werkstoffkennwert $\sigma_{zul,Bauteil}$ hängt von der Größe des Bauteils, dem Spannungszustand im beanspruchten Bauteil, sowie der Streuung des Werkstoffes ab. Es gilt

$$\sigma_{zul,Bauteil} = K_{D,x} \cdot K_{S,x} \cdot \sigma_{97,5\%}(m, \sigma_c)$$

Mit K_D als Größeneinflussfaktor, K_S als Spannungseinflussfaktor und $\sigma_{97,5\%}(m, \sigma_c)$ als Bruchfestigkeit der uniaxial beanspruchten Probekörper mit einer Ausfallwahrscheinlichkeit von 2,5 %.

2.1 Ermittlung des Größeneinflussfaktors von K_D

Der Größeneinflussfaktor berechnet sich aus der Geometrie des Bauteils und der Geometrie des Probekörpers. Es können sowohl die Volumina (Index V), als auch die Oberflächen (Index S) als Rissursprung angenommen werden.

$$K_{D,V} = \left(\frac{V_{Probe}}{V_{Bauteil}}\right)^{1/m} \quad \text{bzw.} \quad K_{D,S} = \left(\frac{S_{Probe}}{S_{Bauteil}}\right)^{1/m}$$

Für den Probekörper ist, soweit nicht anders angegeben, das unter Zugspannung stehende Volumen einer Biegeprobe einzusetzen. Für die genormte Biegeprobe mit einer belasteten Länge von $L = 40 \text{ mm}$ (gem. EN60672-2:2000) gilt

ein Probekörpervolumen von

$$V_{Probe} = 240 \text{ mm}^3$$

bzw. eine Probekörperoberfläche von

$$S_{Probe} = 160 \text{ mm}^2.$$

Für das Bauteil ist das gesamte Volumen einzusetzen. Sind größere Bereiche des Bauteils spannungsfrei, können diese abweichend vom Gesamtvolumen abgezogen werden.

2.2 Ermittlung des Spannungseinflussfaktors von $K_{S,x}$

Der Spannungseinflussfaktor kann aus den folgenden Tabellen entnommen werden. Der Spannungszustand des Bauteils bezieht sich hierbei auf die Bereiche mit den höchsten Hauptnormalspannungen. Eine in alle drei Richtungen gleichmäßig anstehende Zugbelastung wird in der Realität nicht vorkommen, so dass die Annahme eines zweidimensionalen Spannungszustandes eine für die meisten Spannungsverläufe konservative Abschätzung bedeutet. Die Tabellen basieren auf der Normalspannungshypothese unter Berücksichtigung der Risslage (*NSmR*).

Spannungsreduzierung bei zweidimensionalem Spannungszustand

| $\begin{matrix} 1 & 0 & 0 \rightarrow \\ 1 & 1 & 0 \end{matrix}$ | $K_{S,V} = K_{S,S} = \frac{\sigma_{\text{zwei axial}}}{\sigma_{\text{ein axial}}} \text{ in } \%$ | | | | | | | | | | |
|--|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Weibull <i>m</i> | 5 | 7 | 8 | 10 | 12 | 14 | 15 | 16 | 18 | 20 | 25 |
| <i>NSmR</i> | 76 | 80 | 82 | 84 | 86 | 87 | 88 | 88 | 89 | 90 | 92 |

Spannungserhöhung bei zweidimensionalem Zug-Druck-Spannungszustand

| $\begin{matrix} 1 & 0 & 0 \rightarrow \\ 1 & -1 & 0 \end{matrix}$ | $K_{S,V} = K_{S,S} = \frac{\sigma_{\text{Zug-Druck}}}{\sigma_{\text{einaxial}}} \text{ in } \%$ | | | | | | | | | | |
|---|---|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Weibull m | 5 | 7 | 8 | 10 | 12 | 14 | 15 | 16 | 18 | 20 | 25 |
| NSmR | 108 | 105 | 105 | 104 | 103 | 103 | 102 | 102 | 102 | 102 | 101 |

Spannungsreduzierung bei dreidimensionalem Zugspannungszustand

| $\begin{matrix} 1 & 0 & 0 \rightarrow \\ 1 & 1 & 1 \end{matrix}$ | $K_{S,V} = \frac{\sigma_{\text{dreiaxialer Zug}}}{\sigma_{\text{einaxial}}} \text{ in } \%$ | | | | | | | | | | |
|--|---|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Weibull m | 5 | 7 | 8 | 10 | 12 | 14 | 15 | 16 | 18 | 20 | 25 |
| NSmR | 62 | 68 | 70 | 74 | 76 | 79 | 80 | 80 | 82 | 83 | 85 |

Spannungserhöhung bei Zug-Doppeldruck-Beanspruchung

| $\begin{matrix} 1 & 0 & 0 \rightarrow \\ 1 & -1 & -1 \end{matrix}$ | $K_{S,V} = \frac{\sigma_{\text{Zug-2Druck}}}{\sigma_{\text{einaxial}}} \text{ in } \%$ | | | | | | | | | | |
|--|--|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Weibull m | 5 | 7 | 8 | 10 | 12 | 14 | 15 | 16 | 18 | 20 | 25 |
| NSmR | 116 | 111 | 109 | 107 | 106 | 105 | 105 | 105 | 104 | 104 | 103 |

2.3 Ermittlung der bauteilunabhängigen Werkstoffbruchspannung $\sigma_{97,5\%}(m, \sigma_c)$

Der Bruchfestigkeitswert des Werkstoffes für 2,5% Ausfallwahrscheinlichkeit kann durch analytische Berechnung der Weibullfunktion mit den Werkstoffdaten m und σ_c bestimmt werden. Der Wert kann vereinfacht auch aus der folgenden Tabelle entnommen werden.

| m | 5 | 8 | 10 | 12 | 14 | 15 | 16 | 18 | 20 | 25 |
|-------------------|---------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| σ_c in MPa | $\sigma_{97,5\%}(m, \sigma_c)$ in MPa | | | | | | | | | |
| 200 | 96 | 126 | 138 | 139 | 147 | 154 | 159 | 163 | 166 | 173 |
| 220 | 105 | 139 | 152 | 162 | 169 | 172 | 175 | 179 | 183 | 190 |
| 240 | 115 | 151 | 166 | 177 | 185 | 188 | 191 | 196 | 200 | 207 |
| 260 | 124 | 164 | 180 | 191 | 200 | 203 | 207 | 212 | 216 | 224 |
| 280 | 135 | 176 | 194 | 206 | 215 | 219 | 222 | 228 | 233 | 242 |
| 300 | 143 | 189 | 207 | 221 | 231 | 235 | 238 | 245 | 250 | 259 |
| 320 | 153 | 202 | 221 | 235 | 246 | 250 | 254 | 261 | 266 | 276 |
| 340 | 163 | 215 | 235 | 250 | 261 | 266 | 270 | 277 | 283 | 293 |
| 360 | 172 | 227 | 249 | 265 | 277 | 282 | 286 | 293 | 299 | 311 |
| 380 | 181 | 239 | 263 | 280 | 292 | 297 | 302 | 310 | 316 | 328 |
| 400 | 191 | 252 | 277 | 294 | 308 | 313 | 318 | 326 | 333 | 345 |
| 420 | 201 | 265 | 291 | 309 | 323 | 329 | 334 | 342 | 349 | 362 |
| 440 | 211 | 278 | 305 | 324 | 338 | 344 | 350 | 359 | 366 | 380 |
| 460 | 220 | 290 | 318 | 339 | 354 | 360 | 366 | 375 | 383 | 397 |
| 480 | 230 | 303 | 332 | 353 | 369 | 376 | 381 | 391 | 399 | 414 |
| 500 | 240 | 316 | 346 | 368 | 385 | 391 | 397 | 408 | 416 | 431 |
| 520 | 250 | 328 | 360 | 383 | 400 | 407 | 413 | 424 | 433 | 449 |
| 540 | 258 | 341 | 374 | 397 | 415 | 423 | 429 | 440 | 449 | 466 |
| 560 | 268 | 353 | 387 | 412 | 431 | 438 | 445 | 457 | 466 | 483 |
| 580 | 278 | 366 | 402 | 427 | 446 | 454 | 461 | 473 | 483 | 500 |
| 600 | 287 | 379 | 415 | 442 | 461 | 469 | 477 | 489 | 499 | 518 |
| 620 | 297 | 391 | 429 | 456 | 477 | 485 | 493 | 505 | 516 | 535 |
| 640 | 306 | 404 | 443 | 471 | 492 | 501 | 508 | 522 | 532 | 552 |
| 660 | 317 | 416 | 457 | 486 | 507 | 516 | 524 | 538 | 549 | 570 |
| 680 | 325 | 429 | 470 | 500 | 523 | 532 | 540 | 554 | 566 | 587 |
| 700 | 336 | 441 | 484 | 515 | 538 | 548 | 556 | 571 | 582 | 605 |
| 750 | 360 | 473 | 519 | 552 | 576 | 587 | 596 | 611 | 624 | 647 |
| 800 | 383 | 505 | 553 | 588 | 615 | 626 | 635 | 652 | 665 | 690 |
| 850 | 407 | 537 | 588 | 626 | 654 | 665 | 675 | 693 | 707 | 733 |

2.4 Ermittlung der zulässigen Bauteilspannung

Nach Ermittlung der Kennwerte ergibt sich die zulässige Bauteilspannung. Dabei können sowohl die Oberflächen (Index S), als auch die Volumina (Index V) betrachtet werden.

2.4.1 Statische Beanspruchung

$$\text{Oberflächen} \quad \sigma_{zul,Bauteil} = K_{D,S} \cdot K_{S,S} \cdot \sigma_{97,5\%}(m, \sigma_c)$$

$$\text{Volumina} \quad \sigma_{zul,Bauteil} = K_{D,V} \cdot K_{S,V} \cdot \sigma_{97,5\%}(m, \sigma_c)$$

2.4.2 Auslegung gegen Ermüdung (dynamisch und statisch)

2.4.2.1 Geringes unterkritisches Risswachstum

Keramische Werkstoffe, die nicht zu unterkritischem Risswachstum neigen ($n > 30$), werden auch für dynamische Lastfälle statisch ausgelegt. Es gilt wie unter 2.4.1

$$\text{Oberflächen} \quad \sigma_{zul,Bauteil} = K_{D,S} \cdot K_{S,S} \cdot \sigma_{97,5\%}(m, \sigma_c)$$

$$\text{Volumina} \quad \sigma_{zul,Bauteil} = K_{D,V} \cdot K_{S,V} \cdot \sigma_{97,5\%}(m, \sigma_c)$$

2.4.2.2 Hohes unterkritisches Risswachstum¹

Für keramische Werkstoffe, die zu unterkritischem Risswachstum neigen ($n < 30$), gilt eine ähnliche Auslegung, wie für spröde metallische Werkstoffe unter Wechselbeanspruchung.

$$\text{Oberflächen} \quad \sigma_{zul,Bauteil} = 0,3 \cdot K_{D,S} \cdot K_{S,S} \cdot \sigma_{97,5\%}(m, \sigma_c)$$

$$\text{Volumina} \quad \sigma_{zul,Bauteil} = 0,3 \cdot K_{D,V} \cdot K_{S,V} \cdot \sigma_{97,5\%}(m, \sigma_c)$$

3. Dimensionierung neuer keramischer Strukturbauteile

Zusätzliche Sicherheitswerte werden in dieser Auslegungsvorschrift nicht angegeben. Sie ergeben sich aus den Anforderungen der Anwendung und können vom Konstrukteur entsprechend gewählt werden. Die Berechnungsvorschrift gibt eine Spannung $\sigma_{zul,Bauteil}$ an, mit dem in der Entwurfsphase neue Bauteile hinsichtlich ihrer Festigkeit dimensioniert werden können. Verglichen wird die zulässige Bauteilspannung mit der größten 1. Hauptnormalspannung, die im Bauteil vorliegt.

$$\sigma_{zul,Bauteil} \geq \sigma_{I,max,Bauteil}$$

¹ Es wird vereinfachend ein Threshold-Wert von $K_{I,th} \approx 0,3 \cdot K_{I,c}$ sowohl für statische, als auch für dynamische Ermüdung angenommen. Um eine präzisere Angabe machen zu können, sind weitere Forschungsaktivitäten im Bereich der Ermüdung von keramischen Werkstoffen erforderlich.

Literatur

- [ALB05] Albers, A.; Arslan, A.; Mitariu, M.: *Clutches using Engineering Ceramics as Friction Material*, in: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 36 (3-4), 2005, S. 102–107.
- [ALB10A] Albers, A.; Bernhardt, J.; Ott, S.: *Development and Validation of Lubricated Multi-Disk Clutch Systems with Advanced Ceramics*, in: *Mechanical Properties and Performance of Engineering Ceramics and Composites V*, Vol. 31, Iss. 2, 2010, S. 309–315.
- [ALB10B] Albers, A.; Meid, M.: *Advanced Ceramic-Steel Pairings Under Permanent Slip for Dry Running Clutch Systems*, in: *Mechanical Properties and Performance of Engineering Ceramics and Composites V*, Volume 31, Issue 2, 2010. S. 295–307.
- [ALB11A] Albers, Albert; Schneider, J.: *Hochbeanspruchte Gleit- und Friktionssysteme auf Basis ingenieurkeramischer Werkstoffe*, Abschlusskolloquium am 25. Oktober 2011, KIT scientific reports 7602, Karlsruhe, 2011.
- [ALB11B] Albers, A.; Düser, T.: *Validierung im Produktentstehungsprozess, Systemleichtbau durch keramische Werkstoffe als Beispiel*, in: Frank Henning und Elvira Moeller (Hg.): *Handbuch Leichtbau, Methoden, Werkstoffe, Fertigung*, Hanser-Verlag, München 2011, S. 139ff.
- [AND94] Andreasen, J. H.: *Reliability-based design of ceramics*, in: *Materials & Design* Volume 15 (1), 1994, S. 3–13.
- [ANG11] Ang, S. F.; Schulz, A.; Pacher Fernandes, R.; Schneider, Gerold A.: *Sub-10-micrometer toughening and crack tip toughness of dental enamel*, in: *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 4 (3), S. 423–432.
- [ASH11] Ashby, M. F.: *Materials selection in mechanical design*, Butterworth-Heinemann, Burlington, 2011.
- [ASH10] Ashby, M. F.; Johnson, Kara: *Materials and design, The art and science of material selection in product design*, Butterworth-Heinemann, Amsterdam, 2010.
- [BAR06] Bartelt, H.-Ch.: *Entwicklung von Bauteilen aus keramischen Werkstoffen für Axialkolbenmaschinen der Hydrostatik*, Cuvillier-Verlag, Göttingen, 2006.
- [BAR03] Bartz, W. J.: *Keramiklager. Werkstoffe - Gleit- und Wälzlager – Dichtungen*, Expert-Verlag, Renningen, 2003.

- [BECH12] Bechtle, S.; Özcoban, H.; Lilleodden, E. T.; Huber, N.; Schreyer, A.; Swain, M. V.; Schneider, G. A.: *Hierarchical flexural strength of enamel: transition from brittle to damage-tolerant behaviour*, in: Journal of The Royal Society Interface 9 (71), 2012, S. 1265–1274.
- [BIN09] Binz, H.: *Hybride Welle-Nabe-Verbindungen mit Naben aus monolithischer Keramik*, in: Konstruktion (Ingenieur-Werkstoffe) (5), 2009, S. 51–52.
- [BLA09] Blacha, M.: *Grundlagen zur Berechnung und Gestaltung von Querpressverbänden mit Naben aus monolithischer Keramik*, Dissertation am Institut für Konstruktionstechnik u. Technisches Design, Stuttgart, 2009.
- [BOD96] Bode, E.: *Konstruktionsatlas, Werkstoffgerechtes Konstruieren, verfahrensgerechtes Konstruieren* mit 1200 Konstruktionsbeispielen, Vieweg-Verlag, Braunschweig 1996.
- [BRE03] Verband der keramischen Industrie, e.V.: *Brevier Technische Keramik*, Informationszentrum Technische Keramik (IZTK), 2003.
- [BRÜ93] Brückner-Foit, A.; Munz, A.; Heger, D.: *Festigkeits- und Lebensdauerverteilung keramischer Komponenten unter mehrachsiger Belastung*, in: Georg Grathwohl (Hg.): *Mechanische Eigenschaften keramischer Konstruktionswerkstoffe*, Keramik in Wissenschaft und Praxis, 1993, S. 43–54.
- [BUX94] Buxbaum, O.; Sonsino, C. M.; Esper, F. J.: *Fatigue Design Criteria for Ceramic Components under Cyclic Loading*, in: International Journal of Fatigue 16 (4), 1994, S. 257–265.
- [CAL00] Cales, B.: *Zirconia as a Sliding Material*, Histologic, Laboratory, and Clinical Data, in: Clinical Orthopaedics and Related Research, Vol. 379: Williams & Wilkins, 2000, S. 94–112.
- [CAR89] Nemeth: *Ceramic Analysis and Reliability Evaluation of Structures (CARES) manual*. Unter Mitarbeit von J. Gyekenyesi J. Manderscheid. Hg. v. Washington (DC) NASA TP-2916, 1989.
- [CLAU10] Clausen, J.-O.; Abou Tara, M.; Kern, M.: *Dynamic Fatigue and Fracture Resistance of Non-Retentive All-Ceramic Full-Coverage Molar Restorations, Influence of Ceramic Material and Preparation Design*, in: Dental Materials 26 (6), 2010, S. 533–538.
- [COL03] Collins, J. A.: *Mechanical Design of Machine Elements and Machines, A Failure Prevention Perspective*, Wiley, New York, 2003.

- [DAN07] Danzer, R.: *The Ball on Three Balls Test, Strength and Failure Analysis of Different Materials*, in: Journal of the European Ceramic Society 27, 2007, S. 1481–1485.
- [DAU89] Dauskardt, R. H.; Ritchie, R. O.: *Cyclic Fatigue-Crack Propagation Behavior in Advanced Ceramics*, A Collection of Papers Presented at the 13th Annual Conference on Composites and Advanced Ceramic Materials: Ceramic Engineering and Science Proceedings (9/10), 1989.
- [GIL95] Gilbert, C. J.; Dauskardt, R. H.; Ritchie, R. O.: *Behavior of cyclic fatigue cracks in monolithic silicon nitride*, in: Journal of the American Ceramic Society 78, 1995, S. 2291–2300.
- [GIL00] Gilbert, C. J.; Bloyer, D. R.; Barsoum, M. W.; El-Raghy, T.; Tomsia, A. P.; Ritchie, R. O.: *Fatigue-crack growth and fracture properties of coarse and fine-grained Ti_3SiC_2* , in: Scripta Materialia 42 (8), 2000, S. 761–767.
- [DKG97] Deutsche Keramische Gesellschaft [u.a.] (Hg.): *Symposium Keramische Werkstoffe in Maschinen und Anlagen*. Fortschrittsberichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft: Werkstoffe, Verfahren, Anwendung, ISSN 0177-6983, Köln, 1997.
- [DUER09] Dürr, H.R.: *Problemfall Keramikbruch*, in: Orthopäde 38 (8), 2009, S. 698–703.
- [EDW08] Edwards, M. J.; Sandifer, J. B.; Duffy, S. F.; Brown, T. S.: *High-Temperature Life Prediction of Monolithic Silicon Carbide Heat Exchanger Tubes*, Proceedings of the 17th Annual Conference on Composites and Advanced Ceramic Materials: Ceramic Engineering and Science Proceedings, John Wiley & Sons, 2008.
- [EHR09] Ehrlenspiel, K.: *Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*, Hanser, München, 2009.
- [FET00] Fett, Th.: *A Round Robin on Dynamic Bending Tests*, in: Ceramic forum international (cfi), Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft 77 (1-2), 2000, S. 7–10.
- [FET07] Fett, Th.: *A 3-ball-on-3-balls strength test for ceramic disks*, Journal of the European Ceramic Society 27, 2007, S. 1–12.
- [FET08] Fett, Th.: *Progress in Strength, Toughness and Lifetime Methods for Ceramics*, Wissenschaftliche Berichte FZKA 7338, Hg. v. Helmholtz-Gemeinschaft, Karlsruhe 2008.
- [FET90] Fett, Th.: *Influence of R-curve effects on lifetimes in static tests*, Journal of Materials Science Letters 9, 1990, S. 1471–1472.

- [FET91] Fett, Th.: *Determination of $da/dN-\Delta K_I$ curves for small cracks in alumina in alternation bending tests*, Journal of Materials Science 26, 1991, S. 3320–3328.
- [FET98] Fett, Th.: *A relation for Cyclic Crack Growth in Ceramics*, Journal of Materials Science Letters 17 (4), 1998, S. 307–309.
- [FRÖ10] Fröschl, J.: Neuer Ansatz zur Bewertung von Stützwirkung und statistischem Größeneinfluss im Auslegungsprozess. Unter Mitarbeit von M. Eichsleder W. Decker. In: Auslegungs- und Absicherungskonzepte der Betriebsfestigkeit, DVM-Bericht 137, 2010, S. 87–97.
- [FÜN09] Fünfschilling, St.: *Mikrostrukturelle Einflüsse auf das R-Kurvenverhalten bei Siliciumnitridkeramiken*, KIT Scientific Publication, Karlsruhe, 2009.
- [FÜN10] Fünfschilling, St.; Fett, Th.; Oberacker, R.; Hoffmann, M. J.; Özcoban, H.; Jelitto, H. et al.: *R-Curves from Compliance and Optical Crack-Length Measurements*, Journal of the American Ceramic Society 93 (9), 2010, S. 2814–2821.
- [GAF97] Gaffal, K.; Usbeck, A. K.; Prechtel, W.: *Neue Werkstoffe ermöglichen innovative Pumpenkonzepte für die Speisewasserförderung in Kesselanlagen*, in: VDI (Hg.): *Innovationen für Gleitlager, Wälzlager, Dichtungen und Führungen*, 13. Jahrestagung VDI-Verl. Bd. 1331, Neu-Ulm, 1997, S. 275ff.
- [GIL00] Gilbert, C. J.; Bloyer, D. R.; Barsoum, M. W.; El-Raghy, T.; Tomsia, A. P.; Ritchie, R. O.: *Fatigue-crack growth and fracture properties of coarse and fine-grained Ti_3SiC_2* , Scripta Materialia 42 (8), 2000, S. 761–767.
- [GRA88] Grathwohl, G.: *Ermüdung von Keramik unter Schwingbeanspruchung*, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 19, 1988, S. 113–124.
- [GRA93] Grathwohl, G. (Hg.): *Mechanische Eigenschaften keramischer Konstruktionswerkstoffe*, Vortragstexte eines DGM/DKG Symposiums am 15. und 16. September 1992 in Karlsruhe, DGM-Informationsgesellschaft, Oberursel, 1993.
- [GUG93] Gugel, E.; Leimer, G.; Grathwohl, G.: *Anwendung von Keramik im konstruktiven Einsatz*, Vortragstexte eines DGM/DKG Symposiums am 15. und 16. September 1992 in Karlsruhe, DGM-Informationsgesellschaft, Oberursel, 1993, S. 3–13.
- [GUI91] Guiu, F.; Reece, M. J.; Vaughan, D. A. J.: *Cyclic fatigue of ceramics*, Journal of Material Science 26 (12), 1991, S. 3275–3286.
- [HÄR09] Härtelt, Martin: *Probabilistische Lebensdauervorhersage für keramische Bauteile unter komplexer zyklischer Beanspruchung*, Shaker-Verlag, Aachen, 2009.

- [HÄR11] Härtelt, M.; Riesch-Oppermann, H.; Schwind, Th.; Kraft, O.; Sglavo, V.: *Statistical Evaluation of Fatigue Crack Propagation from Natural Flaws in Silicon Nitride*, American Ceramic Society, 2011.
- [HAI06] Haibach, Erwin: *Betriebsfestigkeit, Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [HEI03] Heiermann, K.: STAU - a post processor for a finite element program to calculate the failure probability of multiaxially loaded ceramic components. User Manual. Version 4. Hg. v. KIT Karlsruhe, 2003.
- [HEI05] Heinz, B. C.; Mallek, D.: *Vorkommnisse bei Hüft- und Knieendoprothesen*, Orthopäde 34 (1), 2005, S. 47–54.
- [HER10] Hertel, O.; Vormwald, M.: *Size effect in fatigue described by support factors derived from short crack growth consideration*, 18th European Conference of Fracture, Dresden, 2010.
- [Hot11] Hothan, A.; Huber, G.; Weiss, C.; Hoffmann, N.; Morlock, M.: *The influence of component design, bearing clearance and axial load on the squeaking characteristics of ceramic hip articulations*, Journal of Biomechanics 44 (5), 2011, S. 837–841.
- [HUF93] Hufenbach, W.; Gerhardy, Th.: *Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften keramischer Werkstoffe unter Berücksichtigung statistischer Effekte*. Vortragstexte eines DGM/DKG Symposiums am 15. und 16. September 1992 in Karlsruhe, DGM-Informationsgesellschaft, Oberursel, 1993, S. 61–66.
- [JAG05] Jager, Niek de; Fleizer, A. J.; Pallav, P.: *The Influence of Design Parameters on the FEA-determined Stress Distribution in CAD-CAM produced All-Ceramic Dental Crowns*, Dental Materials, Bd. 21, 2005, S. 242–251.
- [JAK94] Jakel, R.: *Programm Weibull - ein Subprocessor zur Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit keramischer Bauteile mittels FEM-Unterstützung*, Institutsmitteilung 19 IMW, Clausthal-Zellerfeld, 1994.
- [JAK97] Jakel, R.: *Ein Beitrag zur Berechnung und konstruktiven Gestaltung keramischer Bauteile, angewendet am Beispiel eines keramischen Heißgasventilatorrades*, VDI-Verl. (Fortschritt-Berichte // VDI Reihe 1, Konstruktionstechnik / Maschinenelemente; 280), Düsseldorf, 1997.
- [JAN10] Jandt, K.; Schwind, Th.; Fünfschilling, St.; Kerscher, E.; Lang, K.-H.; Oberacker, R. et al.: *Failure of Alumina in Torsion Tests*, Advanced Engineering Materials 12 (9), 2010, S. 942–947.

- [JEL07] Jelitto, H.; Felten, F.; Swain, M. V.; Balke, H.; Schneider, G. A.: Measurement of the Total Energy Release Rate for Cracks in PZT under Combined Mechanical and Electrical Loading. In: *Journal of Applied Mechanics* 74 (6), 2007, S. 1197–1211.
- [JEL12] Jelitto, H.; Hackbarth, F., Özcoşan, H.; Schneider, G.A.: *Automated Control of Stable Crack Growth for R-Curve Measurements in Brittle Materials*, Experimental Mechanics, (accepted for publication): Springer, 2012.
- [JIA93] Jian, Wang: *A comparison of failure predictions by dynamic bending and cyclic bending fatigue techniques for Y_2O_3 - ZrO_2 ceramics*, International Journal of Fatigue 15 No. 1, 1993, S. 37–40.
- [KAL06] Kalweit, A.: *Handbuch für Technisches Produktdesign, Material und Fertigung, Entscheidungsgrundlagen für Designer und Ingenieure*, Springer, Berlin, 2006.
- [KIT08] Kita, H.; Hyuga, H.; Kondo, N.; Ohji, T.: *Exergy Consumption Through the Life Cycle of Ceramic Parts*, Applied Ceramic Technology, Bd. 5, 2008, S. 373–381.
- [KLO81] Kloos, K. H.: *Größeneinfluss und Dauerfestigkeitseigenschaften unter Besonderer Berücksichtigung optimierter Oberflächenbehandlung*, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 12 (4), 1981, S. 134–142.
- [KOCH98] Kochanowski, W.; Tillack, P.: *Neue Pumpenlagerwerkstoffe verhindern Schäden an Rohrgehäusepumpen*, in: Gas- und Dampfturbinen, Erhöhung der Verfügbarkeit durch Schadenklärung, Werkstoffoptimierung, Bauüberwachung und Reparaturmassnahmen, 10. VDI-Jahrestagung Schadensanalyse, VDI Verlag, Düsseldorf, 1998.
- [KRE11] Krenkel, W.: *Technische Keramik*, in: Henning, F.; Moeller E. (Hg.): *Handbuch Leichtbau, Methoden, Werkstoffe, Fertigung*, Hanser, München, 2011, S. 393–411.
- [KRA11] Krause, D.; Usbeck, A. K.: *Zyklische Ermüdung von keramischen Strukturbauteilen unter wechselnder und schwellender Torsionsbeanspruchung*, Abschlusskolloquium des SFB 483 der DFG, Symposium Hochleistungskeramik, Karlsruhe, 26.10.2011.
- [KRÜ99] Krüger, S.: *Ein Beitrag zur praxisgerechten Dimensionierung keramischer Bauteile bei mehrachsigen Beanspruchungen*, Papierflieger, Clausthal-Zellerfeld, 1999.
- [LÄP11] Läßle, V.: *Einführung in die Festigkeitslehre*, Lehr- und Übungsbuch, Vieweg-Verlag & Teubner, Wiesbaden, 2011.

- [LIN93] Lindner, H. A.; Thoma, H.-J.: *Die Festigkeit von Bauteilen aus Hochleistungske-
ramik unter mehrachsiger Belastung*, Vortragstexte eines DGM/DKG Symposi-
ums am 15. und 16. September 1992 in Karlsruhe, DGM-
Informationsgesellschaft, Oberursel, 1993, S. 55–60.
- [MAT96] Matt, R.: *Statisches und zyklisches Ermüdungsverhalten umwandlungsverstärk-
ter ZrO₂-Werkstoffe*. IKM (Institut für Keramik im Maschinenbau), Universität
Karlsruhe, 1996.
- [MAY06] May, R. J.; Kaufmann, H.: *Hochleistungskeramik unter zyklischer Belastung.
Bewertung der Schwingfestigkeit hoch belasteter Bauteile*. ,Konstruktion 11/12,
2006, S. IW 10-11.
- [MOE08] Moeller, E. (Hg.): *Handbuch Konstruktionswerkstoffe*, Auswahl, Eigenschaften,
Anwendung, Hanser, München, 2008.
- [MÖR93] Mörgenthaler, K. D.: *Keramikteile im Motorenbau; Anforderungen und Eigen-
schaften*, Vortragstexte eines DGM/DKG Symposiums am 15. und 16. Septem-
ber 1992 in Karlsruhe, DGM-Informationsgesellschaft, Oberursel, 1993, S. 17–
28.
- [MÜL10] Müller-Bollenhagen, C.; Zimmermann, M.; Christ, H.-J.: *Very high cycle fatigue
behaviour of austenitic stainless steel and the effect of strain-induced
martensite*, International Journal of Fatigue 32 (6), 2010, S. 936–942.
- [MUN01] Munz, D.; Fett, Th.: *Ceramics, Mechanical Properties; Failure Behaviour, Mate-
rials Selection*, Springer, Berlin, 2001.
- [NEJ05] Nejma, R.; Lang, K.-H; Löhe, D.: *Isothermal and Thermal-Mechanical Fatigue of
Alumina*, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 36 (3-4), 2005, S. 136–
139.
- [NEJ07] Nejma, R.: *Verformungs- und Versagensverhalten von Aluminiumoxidkeramik
unter isothermer und thermisch-mechanischer Ermüdungsbeanspruchung*, Sha-
ker-Verlag, Aachen, 2007.
- [NIE08] Nitsche, Ch.: *Keramik - eine wirtschaftliche Lösung; Hohe Lebensdauer der
Bauteile überkompensiert die hohen Anschaffungskosten*, Konstruktion 7/8 ,
2008, S. IW 14-15.
- [NOH09] Nohut, S.: *Reliability of Advanced Ceramics; Macro- and Mesoscale Investiga-
tions*, Cuvillier-Verlag, Göttingen, 2009.

- [NOH10] Nohut, S.; Usbeck, A.; Özcoban, H.; Krause, D.; Schneider, G. A.: *Determination of the multiaxial failure criteria for alumina ceramics under tension-torsion test*, Journal of the European Ceramic Society 30 (16), 2010, S. 3339–3349.
- [RAM11] Ramalingam, S.; Reimanis, I. E.; Fuller, E. R.; Haftel, J. D.: *Slow Crack Growth Behavior of Zirconia-Toughened Alumina and Alumina Using the Dynamic Fatigue Indentation Technique*, Journal of the American Ceramic Society 94 (2), 2011, S. 576–583.
- [RÄU79] Räuchle, W.: *Bauteile aus Keramik für Gasturbinen*, Forschungsbericht des Bundesministeriums für Forschung und Technologie, BMFT FBT. T, Technologische Forschung und Entwicklung, ISSN 0340-7608, Eggenstein-Leopoldshafen, 1979.
- [REU07] Reuter, M.: *Methodik der Werkstoffauswahl; Der systematische Weg zum richtigen Material* mit 27 Tabellen und einer Vielzahl nützlicher Internetlinks, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, 2007.
- [RICH06] Richard, H. ; Sander, M.: *Technische Mechanik*, Vieweg-Verlag-Verlag, Wiesbaden, 2006.
- [RICH09] Richard, H. A.; Sander, M.: *Ermüdungsrisse. Erkennen, sicher beurteilen, vermeiden*, in: Ermüdungsrisse, 2009.
- [RIE07] Riesch-Oppermann, H.: *Uncertainty Analysis of Reliability Predictions for Brittle Fracture*, Engineering Fracture Mechanics 74 (74), 2007, S. 2933–2942.
- [RIT03] Ritchie, R. O.; Murakami, Y.: *Cyclic Loading and Fatigue*, Elsevier Pergamon, Amsterdam, 2003.
- [RIT94] Ritchie, R. O.; Dauskardt, R. H.; Venkateswara Rao, K. T.: *Fatigue-crack propagation behavior in monolithic and composite ceramics and intermetallics*, Materials Science 30 (3), 1994, S. 277–300.
- [RIT99] Ritchie, R. O.: *Mechanisms of fatigue-crack propagation in ductile and brittle solids*, International Journal of Fracture 100, 1999, S. 55–83.
- [RÖD08] Rödel, J.: *Hochleistungskeramik 2025*, Strategieinitiative für die Keramikforschung in Deutschland des Koordinierungsausschusses Hochleistungskeramik der DKG und DGM, MAT INFO Werkstoff-Informationsgesellschaft, Frankfurt am Main, 2008.
- [RÖS07] Rösler, J.; Harders, H.; Bäker, M.: *Mechanical behaviour of engineering materials. Metals, ceramics, polymers, and composites*, Springer, Berlin, 2007.

- [RYSCH48] Ryschkewitsch, E.: *Oxydkeramik der Einstoffsysteme vom Standpunkt der physikalischen Chemie*, Springer, Berlin, 1948.
- [SAL07] Salmang, H.; Scholze, H.; Telle, R.: *Keramik, 7.*, völlig neubearbeitete und erw. Auflage, Springer, Berlin, 2007.
- [SAN08] Sander, M.: *Sicherheit und Betriebsfestigkeit von Maschinen und Anlagen. Konzepte und Methoden zur Lebensdauervorhersage*, Springer-Verlag, Berlin, 2008.
- [SCHÄF99] Schäfer, H.; Diederich, R.; Usbeck, A. K.: *Radiallager in Gleitlagerbauart*, Offenlegungsschrift DE 198 24 128 A1, 1999.
- [SCHEU05] Scheunemann, P.: *Verfahren und Vorrichtungen zur Bestimmung von Werkstoffdaten für die Lebensdauerabschätzung keramischer Bauteile*, Cuvillier-Verlag, Göttingen, 2005.
- [SCHIR95] Schirmer, K.-S.: *Entwicklung von Versagenskriterien für keramische Bauteile unter mehrachsiger Belastung*, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995.
- [SCHÖP99] Schöpke, M.: *Gestaltung, Berechnung und Erprobung hochbeanspruchter Keramikbauteile; Lagerplatte und Umsteuerplatte für eine Axialkolbenmaschine*, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1999.
- [SCHWI09] Schwind, Th.; Kerscher, E.; Lang, K.-H.: *Fatigue of Alumina Under Cyclic Torsion Loading*, *Advanced Engineering Materials* 11 (7), 2009, S. 586–589.
- [SCHWI10] Schwind, Th.: *Untersuchungen zum zyklischen Ermüdungsverhalten von Si_3N_4 und Al_2O_3 ausgehend von natürlichen Fehlern*, Shaker-Verlag, Aachen, 2010.
- [SED00] Sedel, L.: *Total Hip Arthroplasty Using a Ceramic Prosthesis*, *Clinical Orthopaedics and Related Research*, Williams & Wilkins (Volume 379), 2000, S. 3–11.
- [SON92] Sonsino, C. M.: *Schwingungsfestigkeit von Al_2O_3 - und Si_3N_4 -Keramiken*, Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit (FB-195), Darmstadt, 1992.
- [SON93] Sonsino, C. M.: *Zur Bewertung des Schwingfestigkeitsverhaltens von Bauteilen mit Hilfe örtlicher Beanspruchungen*, *Konstruktion (Ingenieur-Werkstoffe)* 45 (1), 1993, S. 25–33.
- [SPEI00] Speicher, R.: *Experimentelle und theoretische Untersuchungen der Zuverlässigkeit keramischer Ventilplatten in Diesel-Einspritzpumpen*, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2000.
- [THOM03] Thomsen, M.; Willmann, G.: *Keramische Gleitpaarungen in der Orthopädie*. In: *Der Orthopäde (Der Orthopäde)* 32 (1), 2003, S. 11–16.

- [TIE83] Tiefenbacher, E.: *Bauteile aus Keramik für Gasturbinen*, Forschungsbericht des Bundesministeriums für Forschung und Technologie, BMFT FBT. T, Technologische Forschung und Entwicklung, Eggenstein-Leopoldshafen, 1983.
- [TIE94] Tietz, H.-D.: *Technische Keramik; Aufbau, Eigenschaften, Herstellung, Bearbeitung, Prüfung*, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994.
- [TRÄ10] Träger, M.; Serifsoy, M.: *Betriebsfeste Auslegung von Aggregatbauteilen*, 37. Tagung des DVM - Arbeitskreises Betriebsfestigkeit, 2010, S. 65–74.
- [USB09] Usbeck, A. K.; Krause, D.: *Festigkeitsuntersuchungen an Al₂O₃- und ZrO₂-Rundproben und Verifizierung des bruchmechanischen Rechenansatzes*, 41. Tagung des DVM-Arbeitskreises Bruchmechanik, Wuppertal, 2009, S. 145–155.
- [USB10A] Usbeck, A. K.; Krause, D.: *Fracture of Structural Ceramics under Cycling Load*, 18th European Conference of Fracture, Dresden, 2010.
- [USB10B] Usbeck, A. K.: *Lebenserwartung keramischer Bauteile in hydrostatischen Maschinen*, Interner DFG-Abschlussbericht, Deutsche Forschungsgemeinschaft (FE 271/10), 2010.
- [USB11] Usbeck, A. K.; Krause, D.: *Zyklische Ermüdung von keramischen Strukturbauteilen unter wechselnder und schwellender Torsionsbeanspruchung*, 43. Tagung des DVM-Arbeitskreises Bruchmechanik, Rostock, 2011, pp. 163 - 172.
- [WAL97] Walter, A.: *Die Keramik-Keramik-Paarung*, Orthopäde 26 (2), 1997, S. 110–116.
- [WED92] Weddigen, A. K.: *Zyklische und statische Ermüdung von Siliziumnitridwerkstoffen bei Raumtemperatur*, Institut für Keramik im Maschinenbau, Universität Karlsruhe, 1992.
- [WEI11] Weidenmann, K.; Wanner, A.: *Werkstoffauswahl für den Leichtbau; Werkstoffauswahl mit Werkstoffindices*, in: *Handbuch Leichtbau; Methoden, Werkstoffe, Fertigung*, Hanser-Verlag, München, 2011, S. 163–188.
- [WER07] Werdich, M.; Kübler, K.: *Stirling-Maschinen; Grundlagen, Technik, Anwendungen*, Ökobuch-Verlag, Staufen bei Freiburg, 2011.
- [ZIM06] Zimmermann, D.: *Keramik-Bauteile als antriebstechnische Komponenten*, Konstruktion 11/12, 2006, S. 36–38.

Persönliche Mitteilungen

- [PM-MAY11] Mayer, H; mehrfache Gespräche mit Herrn Helmut Mayer, Leiter Entwicklung, FRIATEC AG, u.a. auf der 16. Veranstaltung des DKG-Fachausschusses „Keramik in der Mess- und Analysetechnik“ am 24.11.11 bei Fa. Krohne Messtechnik, Duisburg, 2011.
- [PM-WÖT11] Wötting, G.; Vorstellung der Produkte der Fa. FCT-Hartbearbeitung am 17.11.11, Hamburg, 2011

DIN-Normen und Richtlinien

- DIN 623, 04/06 Hochleistungskeramik - Monolithische Keramik; Allgemeine und strukturelle Eigenschaften
- DIN EN 843-1, 08/08 Hochleistungskeramik - mechanische Eigenschaften monolithischer Keramik bei Raumtemperatur - Teil1: Bestimmung der Biegefestigkeit
- DIN EN 843-3, 08/05 Hochleistungskeramik - mechanische Eigenschaften monolithischer Keramik bei Raumtemperatur - Teil 3: Bestimmung der Parameter des unterkritischen Risswachstums aus Biegefestigkeitsprüfungen mit konstanter Spannungsrate
- DIN 40680, 08/83 Keramische Werkstücke für die Elektrotechnik
- DIN 40686, 08/83 Oberflächen dichter keramischer Werkstücke der Elektrotechnik
- DIN 44926, 05/91 Keramische Werkstücke für elektrische Heizelemente
- DIN 44932, 12/84 Isolierperlen
- DIN 51105, 08/10 Hochleistungskeramik- Mechanische Eigenschaften monolithischer Keramik bei Raumtemperatur- Hochleistungskeramik - Mechanische Eigenschaften monolithischer Keramik bei Raumtemperatur - Bestimmung der Doppelring-Biegefestigkeit
- DIN EN 60672-1, 05/96 Keramik- und Glasisolierstoffe
Teil1: Begriffe und Gruppeneinteilung.
- DIN EN 60672-2, 10/00 Keramik- und Glasisolierstoffe
Teil 2: Prüfverfahren.

- [FKM03] Forschungskuratorium Maschinenbau (Hg.): *Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen*, VDMA-Verlag, Frankfurt a. Main, 2003.
- [VDI2221] VDI-Richtlinie 2221: *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993.

Zum Forschungsthema betreute Studien-, Diplom- und Bachelorarbeiten

Beigi, Sara Mohammad: *Spannungsanalyse und Optimierung eines Stirling-Kolbens in Stahl-Keramik-Verbundkonstruktion*, große Studienarbeit am PKT, TU Hamburg-Hamburg, 2011.

Demiray, Alper: *Konstruktiver Entwurf eines Regenerators für einen 1kW-Stirlingmotor*, Bachelorarbeit am PKT, TU Hamburg-Hamburg, 2011.

Fleischhauer, Marc: *Bestimmung von effektiven Volumina sowie effektiven Oberflächen von keramischen Strukturbauteilen unter Berücksichtigung verschiedener Versagenshypothesen*, Bachelorarbeit am PKT, TU Hamburg-Hamburg, 2011.

Goßmann, Ulf Christian: *Auslegung von keramischen Radiallagern einer Rohrgehäusespumpe*, Große Studienarbeit am PKT, TU Hamburg-Hamburg, 2008.

Krohn, Henning: *Verbesserung der Steifigkeit eines Prüfstandes für die Ermittlung von R-Kurven an Keramikprobe*, Kleine Studienarbeit am Institut für Keramische Hochleistungswerkstoffe, TU Hamburg-Hamburg, 2008.

Leckband, Katja: *Validität von Versagenskriterien bei mehrachsiger Belastung von Keramiken unter Berücksichtigung der Bruchflächeneigenschaften*, Kleine Studienarbeit am PKT, TU Hamburg-Hamburg, 2008.

Özcoban, Hüseyin: *Keramikgerechtes Konstruieren - Auslegung von keramischen Bauteilen mit dem Programm STAU*, Große Studienarbeit am PKT, TU Hamburg-Hamburg, 2007.

Petuchow, Arthur: *Konstruktive Auslegung einer Zylinder-Kolben-Baugruppe unter Einbeziehung keramischer Werkstoffe am Beispiel eines Stirling-Motors*, Diplomarbeit am PKT, TU Hamburg-Hamburg, 2010.

Piechocki, Christian: *Experimentelle Untersuchung der Reibkräfte in einem Stirlingkolben unter Trockenlaufbedingungen*, Bachelorarbeit am PKT, TUHH, 2012.

Rausch, Fabian: *Optimierung der Lasteinleitung an einem Lebensdauerprüfstand (NPT-Prüfstand) zur Untersuchung von hydrostatischen Bauteilen*, Kleine Studienarbeit am PKT, TU Hamburg-Hamburg, 2007.

Stefaniuk, Adrian: *Optimierung der Flächenpressung in keramischen Gleitlagern durch unterschiedliche Segmentierungsvarianten*, Bachelorarbeit am PKT, TUHH, 2011.

Xie, Yi: *Ermittlung und Optimierung der Temperaturspannungen verschiedener Lagervarianten in Keramik-Metall-Verbundkonstruktion*, große Studienarbeit am PKT, TU Hamburg-Hamburg, 2012.

Produktkataloge und Firmenpräsentationen

- [PK-ALU] Aluminiumoxid C799, RAPAL 100, Fa. Rauschert Heinersdorf-Pressing GmbH, Postfach 1162, 96329 Pressing, 2007.
- [PK-CER] Produktkatalog der Fa. CeramTec: *BIOLOX® – Keramik für die Hüftendoprothetik, Ihre Entscheidung gegen Abrieb und Osteolyse*, CeramTec GmbH, CeramTec-Platz 1–9
73207 Plochingen, 2012.
- [PK-FRI] Produktkatalog der Fa. FRIATEC AG: *FRIALIT®-DEGUSSIT® Oxidkeramik, Anwendungsspektrum*, FRIATEC AG, Division Keramik, Steinzeugstrasse 50, 68229 Mannheim, 2007.
- [PK-KSB] Hartmann, P.: *RESIDUR®- Lager*, Firmenpräsentation KSB AG, Frankenthal 2007.
- [PK-MET] Gesamtkatalog der Fa. METAX: *Gleitringdichtungen, Systeme, Drehdurchführungen, Kupplungen, Hydraulikdichtungen*, METAX Kupplungs- und Dichtungstechnik GmbH, Unter den Linden 34, 35410 Hungen-Obbornhofen, 2012.
- [PK-SCHAE] Schaeffler Technologies GmbH & Co. KG: *Hybrid-Rillenkugellager in Breitstreckwalzen*, Firmen-Broschüre, Hg. v. Schaeffler Technologies GmbH & Co. KG, 2002.
- [PK-SiC] Feinkörniges Siliciumcarbid, EKasic® F der Fa. ESK Ceramics GmbH & Co. KG, Postfach 1530, 87405 Kempten, 2007.
- [PK-ZIR] Magnesiumverstärktes Zirkonoxid, ZIRKONIA M der Fa. Rauschert Heinersdorf-Pressing GmbH, Postfach 1162, 96329 Pressing, 2003.
- [PK-KSB] Hartmann, P.: *RESIDUR®- Lager*, Firmenpräsentation KSB AG, Frankenthal 2007.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Geboren am 22. September 1965 in Bad Schwartau

Berufliche Tätigkeit

| | |
|-------------------|---|
| 06/2006 - heute | Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik der Technischen Universität Hamburg-Harburg |
| 11/2005 - 05/2006 | Elternzeit |
| 10/2003 - 10/2005 | wiss. Mitarbeiterin am Lehrstuhl Mess- und Informationstechnik der Helmut-Schmidt-Universität in Hamburg |
| 01/2003 - 09/2003 | Elternzeit |
| 07/1999 - 12/2002 | Leiterin des Prüffelds bei der Sterling SIHI GmbH in Ludwigshafen |
| 08/1993 - 06/1999 | Entwicklungsingenieurin bei der KSB AG in Frankenthal |

Hochschulstudium

| | |
|-------------------|--|
| 09/1992 - 02/1993 | Studienprojekt in Venezuela (ASA-Programm der Carl-Duisberg-Gesellschaft) |
| 10/1988 - 08/1992 | Maschinenbaustudium an der Technischen Hochschule in Darmstadt (inkl. Austauschjahr am Trinity College in Dublin) Abschluss: Diplomingenieurin „Allgemeiner Maschinenbau“ |
| 10/1985 - 09/1988 | Studium an der Technischen Universität in Clausthal Abschluss: Vordiplom |

Schulbildung

| | |
|-------------------|--|
| 08/1984 - 07/1985 | Staatliche Fremdsprachenschule in Hamburg Abschluss: Staatlich geprüfte Fremdsprachensekretärin |
| 08/1975 - 07/1984 | Wilhelm-Gymnasium in Hamburg Abschluss : Abitur |
| 08/1971 - 07/1975 | Grundschule in Hamburg |

