

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Strukturkeramische Werkstoffe, d. h. Keramiken, deren mechanische Eigenschaften für die Anwendung im Vordergrund stehen, eröffnen durch ihre — verglichen mit Stahl — geringe Dichte, hohe Härte und Verschleißfestigkeit, hohe Formstabilität und Steifigkeit sowie hohe chemische und thermische Stabilität potentielle Einsatzfelder, die mit Metallen oder Kunststoffen nicht erschließbar sind. Dies sind insbesondere Anwendungen bei hohen Temperaturen und unter tribologischer Beanspruchung, wie die Beispiele in Abschn. 2.2 belegen. Es zeigt sich aber auch, dass ein hoher Aufwand in Entwicklung und Fertigung einschließlich ausgiebiger Erprobung erforderlich ist, um marktreife Produkte zu erzeugen. Das damit verbundene unternehmerische Risiko ist hoch, so dass selbst Großunternehmen die Einführung von Keramik oft nur mit öffentlicher Förderung wagen.

Keramische Werkstoffe erfordern ein Umdenken bei Berechnung und Auslegung: Sprödigkeit, Festigkeitsstreuung sowie die Betriebsfestigkeitsvorhersage gilt es konstruktiv und durch entsprechende Berechnungsgrundlagen in den Griff zu bekommen — dies auch für kleine und mittelständische Unternehmen, die nicht die Möglichkeit zu ausgedehnter Forschung und Erprobung haben.

Die Vorherbestimmung der Kurzzeitfestigkeit von Bauteilen ist prinzipiell mit Hilfe einer statistischen Auswertung des Spannungsfeldes möglich, die von einem bruchmechanischen Ansatz ausgeht (Abschn. 2.3); die größte Unsicherheit liegt dabei in Unterschieden bei der Herstellung von Prüfkörper und Bauteil sowie in der Anwendung unzutreffender Versagenskriterien. Festigkeitswerte der Prüfkörper und statistische Kennwerte liefern i. A. die Keramikhersteller. Zur Lebensdauervorhersage unter proportionaler Belastung liegen Berechnungsgrundlagen vor, die auf einer Erweiterung des Kurzzeitfestigkeitsmodells um unterkritisches Risswachstum beruhen (Abschn. 2.4). Die erforderlichen Parameter der Risswachstumsgesetze können z. T. wissenschaftlichen Veröffentlichungen entnommen werden. Diese gelten allerdings nur für die dort untersuchten Werkstoffvarianten, Herstellverfahren und Umgebungsmedien und werden vorwiegend an künstlich erzeugten Makrorissen ermittelt, deren Verhalten nicht zwingend mit dem der natürlichen Risse im Werkstoff übereinstimmt. Die Bestimmung der Parameter muss daher meist individuell erfolgen.

Sollten nichtproportionale Spannungen, die wechselnde Hauptspannungsrichtungen zur Folge haben können, oder ein Reihenfolgeeffekt infolge von Übergangsrisswachstum nach veränderter Belastungssituation vorliegen, so ist nach dem Stand der Technik keine gesicherte

Vorhersage möglich. Testreihen an einer statistisch relevanten Zahl von Prototypen sind dann erforderlich und gegebenenfalls nach konstruktiven Änderungen am Bauteil zu wiederholen.

1.2 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, eine Basis zur Gewinnung von qualitativen und quantitativen Aussagen über das Risswachstumsverhalten und damit über das Betriebsfestigkeitsverhalten keramischer Bauteile unter Belastungsfällen zu schaffen, die typisch sind für Bauteile hydrostatischer Maschinen und zu denen für keramische Werkstoffe bisher keine gesicherten Erkenntnisse verfügbar sind. Das Gebiet der Hydrostatik wurde aufgrund der für dieses Anwendungsfeld günstig erscheinenden Eigenschaften von Keramik ausgewählt (hohe Härte, chemischen Beständigkeit, hohe Steifigkeit, geringe Wärmeausdehnung und geringe Dichte, siehe Abschn. 2.2, S. 6).

Es sollen Versuchsverfahren und -vorrichtungen zur anwendungsnahen und effizienten Gewinnung der zur Lebensdauerabschätzung erforderlichen Daten entwickelt werden, die auch ohne Vorabkenntnisse über die Festigkeitseigenschaften eines neuen Werkstoffs eine ausreichende Datengrundlage zu einer ersten Bauteilauslegung liefern und somit den Umfang von Prototypentests und das Entwicklungsrisiko verringern helfen. Dabei wird Anwendungsnähe über eine möglichst hohe, aus Kostengründen allerdings nicht vollständige Übereinstimmung von Beanspruchungs- und Fertigungsbedingungen in Versuch und Betrieb erreicht, die der Vermeidung von Unsicherheiten bei der Übertragung von Versuchsergebnissen dient. Diese Versuche sind Bindeglied zwischen Prototypentests in der Endphase der Bauteil- bzw. Produktentwicklung einerseits und dem Versuchswesen zur Ermittlung grundlegender bruchmechanischer Beziehungen andererseits; als solches sollen sie ergänzen und nicht ersetzen.

Die Verfahren und Vorrichtungen sollen dann anhand von Versuchsreihen auf ihre Alltags-tauglichkeit geprüft werden. Als Werkstoffe werden dazu Aluminiumoxid (Al_2O_3), als preiswerter Werkstoff mit hoher Härte und chemischer Beständigkeit aber vergleichsweise geringer Festigkeit, und Zirkonoxid (ZrO_2), das eine hohe Bruchzähigkeit und Festigkeit aufweist¹, ausgewählt.

1.3 Vorgehensweise

Abbildung 1.1 zeigt in vertikaler Richtung den zeitlichen Ablauf der Arbeit und in horizontaler Richtung die Einteilung in Arbeitsebenen, die die unterschiedlichen Tätigkeitsfelder abgrenzen.

Zu Beginn der Arbeit erfolgte neben dem Zusammentragen von vorhandenen Berechnungsgrundlagen für keramische Bauteile und von Gesetzmäßigkeiten der Rissausbreitung (Abschn. 2.3) eine Analyse von zeitlichen Belastungsverläufen schwerpunktmäßig an ausgewählten Bauteilen hydrostatischer Maschinen, die vor allem der qualitativen Bewertung der Betriebsbeanspruchung diente (Kap. 3). Mit besonderer Sorgfalt wurden diejenigen Fälle betrachtet, die nichtproportionale Spannungen aufweisen. Die Ergebnisse der Voruntersuchungen wurden klassifiziert und im Weiteren zur Anforderungsdefinition an die zu entwickelnden Verfahren und Vorrichtungen genutzt (Abschn. 3.4). Die Anforderungen waren Basis für die drei konstruktiv-gestalterischen Hauptaufgaben, die im Folgenden aufgeführt sind:

¹zusätzlich war zu Arbeitsbeginn (2000) die Verfügbarkeit besser als beim bezüglich der Festigkeit vergleichbaren Siliziumnitrid

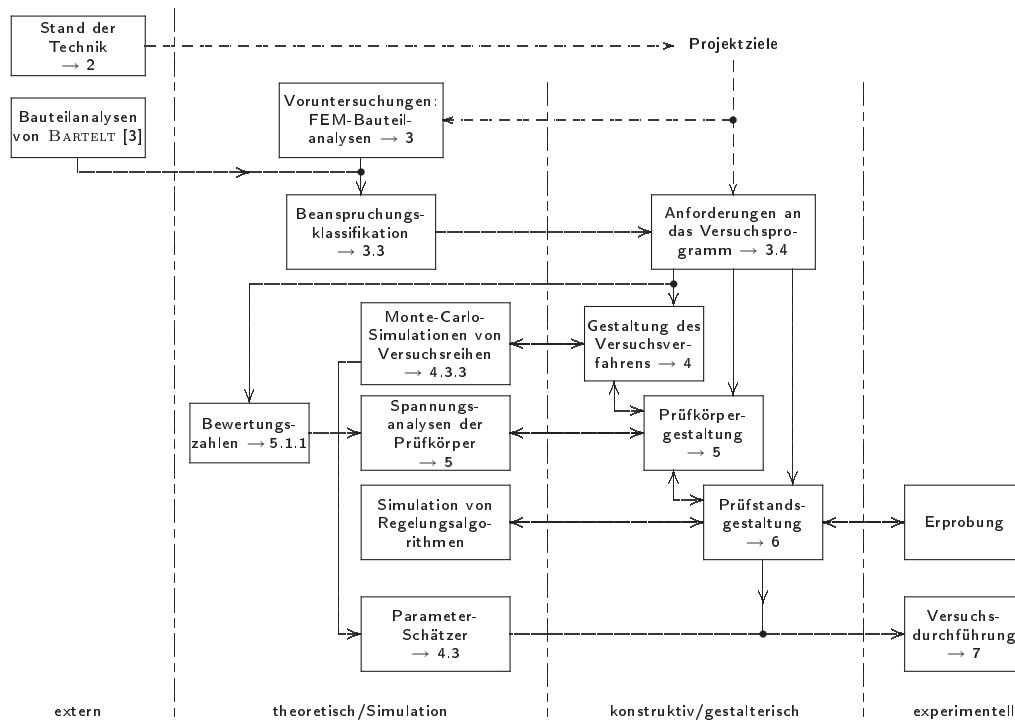


Abbildung 1.1: Ablaufplan und Arbeitsebenen (→ verweist auf die entsprechenden Abschnitte)

Versuchsverfahren (Kap. 4): Hier wurden diejenigen Aspekte des Versuchsverfahrens behandelt, die von der Wahl der Prüfkörper und Prüfstände unabhängig sind. Dies betrifft primär Versuchsinhalte in Form von Belastungs-Zeit-Funktionen und die Schätzmethoden zur Ermittlung von Werkstoffparametern. Als Entscheidungsgrundlage wurden u. a. Monte-Carlo-Simulationen (4.3.3) von Versuchen einschließlich ihrer statistischen Auswertung herangezogen, mit deren Hilfe eine quantitative Bewertung der Aussagegenauigkeit der Ergebnisse in Abhängigkeit vom Aufwand abzuschätzen war. Damit sollte eine möglichst effiziente Versuchsgestaltung gewährleistet werden.

Prüfkörper (Kap. 5): Die Gestaltung der Prüfkörper erfolgte eng verbunden mit Simulationen und analytischen Berechnungen zur Ermittlung der in den Prüfkörpern auftretenden Spannungsfelder, die für die rechnerische Auswertung von Versuchsergebnissen ebenso benötigt wurden, wie zur Gestaltung der Prüfstände. Die Definition von Bewertungszahlen diente der gezielten Auswahl von Probekörpergeometrien, die eine möglichst gute versuchstechnische Unterscheidbarkeit multiaxialer Versagenskriterien erlauben.

Versuchsvorrichtungen (Prüfstände, Kap. 6): Die Gestaltung der Prüfstände begann, sobald die Anforderungen festlagen, die durch die Versuchsinhalte, die Probengeometrie und die Forderung nach Anwendungsnähe zur Hydrostatik bestimmt wurden. Die Aufgabe umfasste den mechanisch-hydraulischen Teil der Prüfstände und die Erstellung von speziellen Regelungsalgorithmen, die an die Gegebenheiten der Prüfstandstechnik und die spezifischen Anforderungen an die Prüfung von keramischen Werkstoffen angepasst sind.

Im Anschluss an diesen gestalterischen Teil der Arbeit erfolgte eine praxisgerechte Erprobung der Verfahren und Prüfstände. Dabei wurden Versuchsreihen mit statistisch relevanten Prüfkörperzahlen durchgeführt und ausgewertet, um für die gewählten Materialien Aussagen

über das Lebensdauerverhalten keramischer Bauteile unter typischen Einsatzbedingungen der Fluidtechnik zu erhalten und gleichzeitig die Alltagstauglichkeit der Prüfstände zu überprüfen. In der vorliegenden Arbeit werden darüber hinaus auch Aspekte bzw. Themen dargestellt, die bezüglich der entwickelten Versuchstechnik nicht zum eigentlichen Kernbereich gehören, jedoch deren Anwendung bzw. deren Verständnis unterstützen oder vereinfachen (z. B. die optische Vermessung von Prüfkörperkonturen, Anh. G).

Kapitel 2

Stand von Technik und Forschung

2.1 Begriffsdefinitionen

Spannungszustände

In der vorliegenden Arbeit werden unterschiedliche Spannungszustände in Bauteilen und Prüfkörpern behandelt; ihre Bezeichnungen entsprechen den Definitionen der FKM-Richtlinie *Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile* [27] und sind hier verkürzt wiedergegeben:

Proportionale Spannungen: Proportionale Spannungen entstehen in der Regel aus einer einzigen auf das Bauteil einwirkenden Belastung. Dabei sind alle — auch mehrachsige — Spannungen zur Belastung und zueinander proportional. Bei zeitlich veränderlicher Belastung also auch bezüglich ihrer Amplituden und Mittelwerte. Als Folge ergeben sich bauteilbezogen *konstante Hauptspannungsrichtungen*. Beispiele für proportionale mehrachsige Spannungen sind Behälter unter Innendruck oder Biege- und Torsionsspannungen bei der Belastung eines eingespannten Stabes durch eine außermittige Einzelkraft.

Synchrone Spannungen: Synchrone Spannungen sind ein Sonderfall der nichtproportionalen periodischen Spannungen. Sie sind hinsichtlich ihrer Amplitude proportional, nicht aber hinsichtlich ihrer Mittelwerte. Synchrone mehrachsige Spannungen entstehen z. B. beim Zusammenwirken einer zeitlich veränderlichen Belastung mit einer zweiten, konstanten Belastung.

Nichtproportionale Spannungen: Nichtproportionale Spannungen entstehen durch das Zusammenwirken mehrerer verschiedenartiger und in unterschiedlicher Weise zeitlich veränderlicher Belastungen. Im allgemeinen Fall sind die Beträge *und* die Richtungen der Hauptspannungen zeitlich veränderlich.

2.2 Keramik als hoch belasteter Konstruktionswerkstoff — Anwendungsbeispiele

Gasturbinen mit keramischem Läufer: Bereits in den 40er Jahren des 20. Jahrhunderts fanden Versuche mit Gasturbinenläufern aus Aluminiumsilikat statt. Dichte, Schmelzpunkt und Materialverfügbarkeit als positive Eigenschaften standen unzureichendem Festigkeitsverhalten entgegen. Es wurden nur geringe Lebensdauern bei moderaten Drehzahlen erreicht aber auch ein hohes Entwicklungspotenzial bescheinigt [33]. Abgasturbolader mit keramischer Tur-

bine werden seit Beginn der 90er Jahre in Serien-PKW verwendet (z. B. NISSAN Skyline GT-R). Im Zeitraum von 1988 bis 1999 wurde in einem vom Japanischen Ministerium für internationalen Handel und Industrie (MITI) geförderten Projekt eine keramische Gasturbine aus Siliziumnitrid (Si_3N_4) mit einer Leistungsabgabe von 300 kW bei einer Turbinen-Eintrittstemperatur von 1350°C entwickelt [69]. Die Turbine erfüllte die Projektziele, ein Folgeprojekt soll die rasche Markteinführung sicherstellen.

Ventile für Verbrennungsmotoren: In einem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojekt wurden Motorventile aus Siliziumnitrid entwickelt und erprobt. Ein zweijähriger Feldversuch mit 1662 Kundenfahrzeugen der DAIMLER-CHRYSLER AG konnte deren „Eignung für den Alltagsinsatz uneingeschränkt nachweisen“ [73]. Der Kraftstoffverbrauch ließ sich um 3-6% reduzieren und die Vollastdrehzahl um bis zu 1000 min^{-1} steigern. Darüber hinaus wird eine Reduzierung der Geräusch- und Stickoxidemission angeführt. Eine Serieneinführung fand bisher noch nicht statt (Stand Mai 2003).

Zylinderlaufbuchse: Ebenfalls im zuvor genannten Verbundprojekt wurde das Einsatzverhalten von Zylinderlaufbuchsen aus siliziuminfiltriertem Siliziumcarbid (SiSiC) in einem Gasverdichter unter Trockenlaufbedingungen untersucht. Hier liegt, im Gegensatz zu den beiden vorherigen Beispielen, ein Anwendungsfall mit primär tribologischer Beanspruchung vor. In der Paarung mit Graphit-Kolben wurden Standzeiten von 5000–10000 h bei der Kompression von Umgebungsluft erreicht. Die Paarung $\text{SiSiC}/\text{SiSiC}$ hingegen brachte Standzeiten von nur ca. 300 h [73].

Wälzlager: Die Verwendung von Wälzkörpern aus Keramik in Verbindung mit Laufringen aus herkömmlichem Wälzlagerstahl (Hybridlager) zur Erweiterung bestehender Betriebsgrenzen zählt mittlerweile zum Stand der Technik. Einsatzfelder sind extrem schnell drehende Triebwerke, Spindellagerungen im Werkzeugmaschinenbau sowie Lagerungen, die unter Mangel-schmierungsbedingungen arbeiten müssen. Überwiegend wird dabei Siliziumnitrid verwendet. Völlig neue Einsatzgebiete werden von vollkeramischen Lagern erschlossen, z. B. Lagerungen in hoch korrosiver Umgebung oder Lauf in flüssigem Metall. Die Kosten für Hybridlager betragen ca. das 2,5-fache einer Ausführung in Stahl, die einer vollkeramischen Lagerung das 10 bis 20-fache, bedingt durch kleine Stückzahlen und die schwierige Bearbeitung der Laufringe [28].

Vollkeramischer Zahnersatz: Ein Einsatzgebiet mit hoher mechanischer Beanspruchung und zusätzlichen Anforderungen an Ästhetik, Bioverträglichkeit und chemischer Beständigkeit ist Zahnersatz im Seitenzahnbereich. Bislang beschränkte sich die Anwendung von Keramik aufgrund der dort auftretenden hohen Kaukräfte auf das Frontzahngebiet. Eine klinische Studie mit 22 Seitenzahnbrücken aus ZrO_2 -TZP (Tetragonal Zirconia Polycrystals), stabilisiert mit 3 mol% Yttriumoxid, zeigte nach einer durchschnittlichen Beobachtungszeit von 385 Tagen keinerlei Risse oder Absplitterungen [65]. Das zugehörige Herstellungsverfahren ist mittlerweile zur Marktreife entwickelt worden (z. B. CERCON SMART CERAMICS von DEGUSSA DENTAL). Langzeitbeobachtungen stehen noch aus.

Einsatz von Keramik in hydrostatischen Maschinen: Für den Einsatz in der Fluidtechnik weisen keramische Werkstoffe eine Reihe von vorteilhaften Eigenschaften auf, durch deren Nutzung Produktverbesserungen erreicht werden können: Die geringe Wärmeausdehnung und

die hohe Steifigkeit der Bauteile lassen kleine Dichtspaltaufweitungen und damit verbesserte volumetrische Wirkungsgrade erwarten. Hohe Härte und chemische Beständigkeit versprechen gesteigerte Lebensdauern und wegen dauerhaft unveränderter Oberflächen gute volumetrische und hydraulisch-mechanische Wirkungsgrade über lange Zeit. Die Temperaturbeständigkeit von Keramik erlaubt kurzzeitige lokale Bauteilüberlastung durch örtlich hohe Reibleistungen, die geringe Dichte führt zu einer Reduzierung der Massenkräfte, was höhere Arbeitsgeschwindigkeiten ermöglicht. SCHÖPKE [59] erläutert diese Zusammenhänge ausführlich.

Anwendung findet Keramik heute in Maschinen der chemischen Industrie zur Förderung von aggressiven oder feststoffhaltigen Medien und in der hydrostatischen Antriebstechnik im Bereich der Wasserhydraulik: Bekannt wurden ein Klarwasser-Ventil mit keramischem Schieber [54] und eine Seewasser-Axialkolbenpumpe für einen Betriebsdruck bis 140 bar mit Gleitpaarungen aus der Kombination Zirkonoxid / kohlefaserverstärktes Polyamid [10].

Im Rahmen eines vom BMBF geförderten Kooperationsprojekts¹, das die Arbeitsbereiche Konstruktionstechnik I und Technische Keramik der TU Hamburg-Harburg gemeinsam mit Industriepartnern durchgeführt haben, wurden die Lagerplatte und die Umsteuerplatte einer Axialkolbenmaschine gestaltet und erprobt [59]. Beide Bauteile unterliegen hoher tribologischer Beanspruchung und einer mechanischen Belastung mit hohen Zugspannungskomponenten. Untersucht wurde der Einsatz von konventionellem Aluminiumoxid, Siliziumnitrid und reaktionsgebundenem Aluminiumoxid (RBAO). Bei Beibehaltung der ursprünglichen Form der Platten konnte mit keinem der zur Verfügung stehenden Werkstoffe eine hinreichend kleine Ausfallwahrscheinlichkeit erreicht werden. Durch Umgestaltung der Platten konnte die Ausfallwahrscheinlichkeit auf ein für die Anwendung akzeptables Maß gesenkt werden, wobei sich bezüglich der Lagerplatte zusätzliche Umgestaltungsmaßnahmen unter Einbeziehung der Einbauumgebung als erforderlich erwiesen. Abschließend wurden Wirkungsgradmessungen und Dauerbetriebsuntersuchungen mit Plattenprototypen in Axialkolbenmaschinen durchgeführt, die eine Wirkungsgradsteigerung, vor allem im Teillastbetrieb, aufzeigten und Laufzeiten ergaben, die die Anforderungen eines Praxiseinsatzes erfüllen würden. Da nur wenige Prototypen untersucht werden konnten, hatten die Dauerversuchsergebnisse keine statistische Relevanz. Im Rahmen der Arbeit zeigten sich z. T. erhebliche Abweichungen zwischen der rechnerischen Lebensdauervorhersage und den experimentell an anwendungsnahen Probekörpern ermittelten Ergebnissen, was deutlich den Bedarf an verbesserten und anwendungsorientierten Berechnungsmodellen belegt.

In einem Nachfolgeprojekt² werden die Untersuchungen auf weitere Bauteile der Fluidtechnik ausgeweitet: Kolben und Buchse einer Axial- und einer Radialkolbenmaschine sowie Dichtelement eines Sitzventils für die Wasserhydraulik.

Die genannten Beispiele zeigen, dass strukturkeramische Werkstoffe gerade in Anwendungen mit extremen Anforderungen und Randbedingungen hohe Leistungspotenziale aufweisen. Andererseits zeigen die erheblichen Anstrengungen, die zum erfolgreichen Einsatz von Keramik erforderlich sind und die bislang geringe Verbreitung in maschinenbaulichen Serienprodukten, dass der konstruktive und fertigungstechnische Umgang mit diesem Werkstoff höhere Anforderungen an den Ingenieur stellt als Metalle. Zum einen entstehen hohe Produktionskosten zur Sicherstellung der festigkeitsbestimmenden Prozessqualität in der Pulverbereitung und die erforderliche Hartbearbeitung von Funktionsflächen, zum anderen besteht ein Mangel an

¹BMBF-Förderkennzeichen 03M2106B

²BMBF/VDMA-Verbundprojekt, Förderkennzeichen 03N5033D