

Keramik als Friktionswerkstoff im CVT–Getriebe

Systemoptimierung im Kfz-Antriebsstrang

Ceramics as friction material in a CVT–gearbox

System optimisation of the vehicle power train

o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers, Karlsruhe

Dipl.-Ing. Andreas Stuffer, Karlsruhe

Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau

UNIVERSITÄT KARLSRUHE

o. Prof. Dr.-Ing. K.-H. Zum Gahr, Karlsruhe

Dr.-Ing. D.-H. Hwang, Karlsruhe

Institut für Werkstoffkunde II, UNIVERSITÄT KARLSRUHE, und

Institut für Materialforschung I, FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

1 Einleitung

Produkte, die sich auf den Märkten moderner Industriegesellschaften durchsetzen oder dort etablieren sollen, müssen stetig steigenden technischen, ökonomischen und ökologischen Anforderungen gerecht werden. Handelt es sich um Investitionsgüter, so kommt der ökonomischen Leistungsfähigkeit eine entscheidende Bedeutung zu.

Diese Ansprüche werden einerseits vom Kunden, andererseits vom jeweiligen Gesetzgeber festgelegt und können oft nur durch den Einsatz moderner Werkstoffe und die optimale Adaption an den Einzelfall erfüllt werden. Keramische Werkstoffe bieten ein besonders großes Potenzial für Bauteile die einer Kombination von hohen mechanischen, tribologischen, thermischen und korrosiven Beanspruchungen ausgesetzt sind. Ihr Einsatz in der Praxis ist allerdings noch nicht diesem Potenzial entsprechend entwickelt. Hohe Kosten und insbesondere eine zu geringe Berücksichtigung der spezifischen Werkstoffanforderungen an die Produktgestaltung erschweren den breiteren Durchbruch der Keramik als Konstruktionswerkstoff. Hier will der neue Sonderforschungsbereich der Deutschen Forschungsgemeinschaft „Hochbelastete Gleit– und Friktionssysteme auf Basis ingenieurkeramischer Werkstoffe“ ansetzen und durch eine kombinierte Erforschung von Werkstoff-

potenzial und keramikgerechter Gestaltungsprinzipien einen Beitrag zur weiteren Verbreitung der Keramik als Konstruktionswerkstoff leisten. Im folgenden wird aus laufenden Arbeiten im Bereich der Getriebeanwendungen berichtet.

2 Getriebe

2.1 Funktion

Antriebsmaschinen für Kraftfahrzeuge haben ein begrenztes Drehzahlband, in dem sie Leistung abgeben können. Außerdem ist ihr Betrieb erst ab einer bestimmten Mindestdrehzahl möglich. Ein Getriebe stellt ein Drehmoment- und Drehzahlwandler dar und wird eingesetzt, um diesen nutzbaren Drehzahlbereich des Motors auf ein möglichst breites Fahrgeschwindigkeitsspektrum aufzuteilen. Moderne Schaltgetriebe im Pkw besitzen bis zu 6 Gangstufen plus Rückwärtsgang. Die einzelnen Übersetzungen werden nach einer reziprok arithmetischen Reihe gestuft, wobei der kleinste Gang nach der gewünschten Steigfähigkeit und der größte Gang nach der maximal erreichbaren Geschwindigkeit oder als Economy-Gang ausgelegt werden. Das Verhältnis von größter zu kleinster Übersetzung wird als Spreizung bezeichnet.

2.2 Stand der Technik

Grundsätzlich kann zwischen stufenlosen Getrieben und den klassischen Getrieben mit Schaltstufen unterschieden werden, wobei die Stufengetriebe zusätzlich teil- oder vollautomatisiert angeboten werden. Die Marktanteile der Getriebevarianten hängen stark von Fahrzeugklasse, Motorisierung und Absatzmarkt ab.

So finden sich Handschaltgetriebe in Europa überwiegend in der Kompakt- und Mittelklasse, während vollautomatische Schaltgetriebe mit Planetenstufen ohne Zugkraftunterbrechung bevorzugt in der Ober- und Luxusklasse eingesetzt werden. Die Gründe hierfür liegen in der höheren Komplexität, den damit verbundenen höheren Kosten und dem schlechteren Wirkungsgrad dieser Automatikgetriebe. Dafür bieten diese Vorteile in Belastbarkeit und Komfort. Stufenlose Getriebe wurden bisher fast ausschließlich in schwächer motorisierten Kleinwagen eingesetzt. Der Grund für diese Beschränkung war die relativ geringe Belastbarkeit der Getriebekomponenten.

Durch intensive Entwicklungsarbeit und zahlreiche Neuentwicklungen kann seit

Oktober 1999 ein Serienfahrzeug der Oberklasse mit 2,8 Litern Hubraum, 142 kW und 280 Nm Drehmoment mit stufenlosem Getriebe angeboten werden. Es ist das erste Serienfahrzeug mit Getriebeautomaten, das in den beiden Punkten Fahrleistung und Durchschnittsverbrauch das entsprechende Fahrzeug mit Handschaltgetriebe übertrifft. Zusätzlich wird der Fahrkomfort von den Kunden als besonders positiv beurteilt. Bereits ein Jahr nach der Serieneinführung besitzt diese Getriebevariante eine Einbaurrate von 45 Prozent, was gleichzeitig bedeutet, dass viele Kunden von einem Handschaltgetriebe zu diesem stufenlosen Automatikgetriebe gewechselt haben. Das Produkt hat sich damit sehr erfolgreich am Markt platzieren können.

2.3 Anforderungen an Getriebe

Die Forderungen an Fahrzeuggetriebe, die erfolgreich am Markt platziert werden sollen, können mit einem Begriff zusammengefasst werden: marktgerecht. Bei näherer Betrachtung kann dieser Begriff in die Anforderungen derer unterteilt werden, die zusammen den Markt bilden: der Fahrzeughersteller, der das Getriebe als Systemkomponente im Antriebsstrang einsetzt, der Endverbraucher, der das Gesamtfahrzeug als Konsum- oder Investitionsgut erwirbt und die Getriebeproduzenten mitsamt deren Wettbewerbern.

Welche Aspekte in Bezug auf Getriebe sind jeweils von besonderer Bedeutung und bestimmen damit auch die Produktgestaltung und Werkstoffwahl?

Endverbraucher: Kosten: Unterhalts- und Betriebskosten (Steuer, Kraftstoff, Öl)
Anschaffungskosten, Zuverlässigkeit
Komfort: Bedienungsbedarf und Geräuschverhalten
Länge und Häufigkeit der Zugkraftunterbrechungen
Schalt- und Anfahrqualität
Fahrleistung / Sicherheit: Zugkraftüberschuss, Anfahrverhalten

Fahrzeughersteller: Kosten: Gesamtkosten für Einsatz im Serienfahrzeug
Flexibilität: Modulbauweise, einfache Abstimmbarkeit auf
Motorcharakteristik möglichst per Software

Physikalische Eigenschaften: Bauraum, Gewicht

Gesamtwirkungsgrad des Antriebsstrangs

Kundenattraktivität: Begeisterungsmerkmale

Differenzierungseigenschaften zum Wettbewerb

Alleinstellungsmerkmale

Getriebeproduzent: Gewinn: Differenz aus Marktpreis und Herstellkosten

Flexibilität: Variantenbedarf

Abstimmbarkeit auf Motorcharakteristik

Zuverlässigkeit: Ausfallquote in Kundenfahrzeugen

Lebensdauer

Gesetzgeber: Emissionen: Geräuschverhalten, Einfluss auf Motoremission

Bezogen auf den hier diskutierten Einsatz keramischer Konstruktionswerkstoffe ist die derzeit in der Markteinführung befindliche „Keramik-Bremse“ ein typisches Beispiel. Trotz zur Zeit noch sehr viel höherer Kosten gelingt es, das System sehr erfolgreich am Markt zu platzieren, da insbesondere die höhere Leistungsfähigkeit und die besonders hervorgehobenen Begeisterungs- und Differenzierungsmerkmale im Markt gegeben sind. Die Marktpenetration erfolgt dabei typisch Top Down, d. h. neue Technologien werden zunächst im Hochpreissegment des Marktes eingeführt. Das Beispiel zeigt aber auch, dass höhere Werkstoffkosten zwar ein Handicap für die Umsetzung sind, aber keinesfalls als „K.O.- Kriterium“ für Entwicklung und Umsetzung neuer Lösungen mit neuen Werkstoffen gelten dürfen. Dies gilt auch für die hier diskutierten Ansätze im Getriebebau.

Der Stand der Technik im Hinblick auf Stufenlose Getriebe spiegelt deutlich wieder, welcher Markterfolg erzielt werden kann, wenn ein Produkt den oben genannten Forderungen zu einem großen Teil entspricht. Nachfolgend wird zunächst ein kurzer Überblick über diese Getriebebauform gegeben und daraufhin wird deren Entwicklungspotential – speziell auch unter dem Gesichtspunkt neuer Konstruktionswerkstoffe – aufgezeigt.

3 Stufenlose Getriebe mit Umschlingungsmittel

3.1 Aufbau

Diese Getriebebauform besteht aus Eingangs- und Ausgangswelle mit jeweils einer feststehenden und einer axial verstellbaren kegeligen Stahlscheibe. In dem Keil der durch ein Kegelscheibenpaar gebildet wird, befindet sich das Umschlingungsmittel, über dessen Flanken die Leistung zwischen den Getriebewellen übertragen wird.

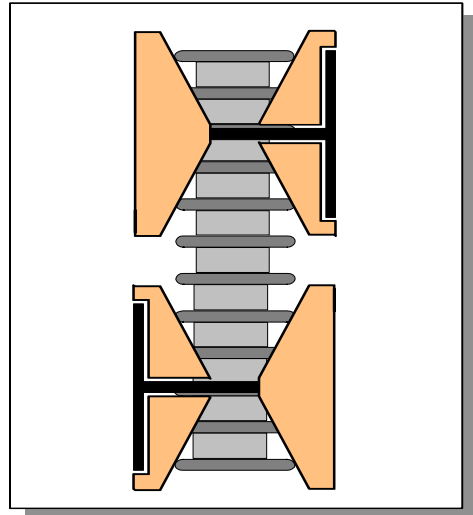


Abbildung 1: CVT – Schema

3.2 Funktion

Im Falle des CVT-Getriebes (Continuously Variable Transmission) wird die Leistung vom Antriebsscheibensatz über das Umschlingungsmittel (Kette) auf den Abtriebsscheibensatz übertragen. Durch axiales Verstellen der kegeligen Scheibensätze lässt sich der Laufradius der Kette und somit das Übersetzungsverhältnis kontinuierlich – auch unter voller Last – ändern.

Im Gegensatz zu einem verzahnten Getriebe überträgt ein stufenloses Getriebe mit Umschlingungsmittel die Kraft reibschlüssig und nicht formschlüssig. Charakteristisch für reibschlüssige Kraftübertragungsmechanismen ist der Schlupf zwischen den Kontaktpartnern, dieser bewirkt Verluste, die einerseits den Wirkungsgrad schmälern und andererseits den Verschleiß erhöhen. Die axiale Anpresskraft zwischen Kegelscheiben und Kette wird in der Regel über einen hydraulischen Druckraum erzeugt. Die dafür benötigten Nebenaggregate wie zum Beispiel die Pumpe setzen den Wirkungsgrad des Getriebes zusätzlich herab.

Weshalb kann trotzdem eine Systemkomponente mit hohem Wirkungsgrad wie das Handschaltgetriebe durch ein stufenloses Getriebe mit schlechterem Einzelwirkungsgrad erfolgreich ersetzt werden?

3.3 Schlechterer Einzelwirkungsgrad = besserer Gesamtwirkungsgrad: ein Widerspruch?

Der Wirkungsgrad eines Handschaltgetriebes bewegt sich im Bereich zwischen 95 und 98 Prozent und bietet damit nur noch wenig Potenzial zur Optimierung. Hingegen erreicht ein stufenloses Getriebe nur in günstigen Betriebspunkten Wirkungsgrade deutlich über 90 Prozent. Dieser geringere Wirkungsgrad des stufenlosen Getriebes sollte eigentlich eine Verschlechterung des Gesamtsystems Antriebsstrang hervorrufen. Diese tritt jedoch nicht ein; vielmehr kann das neue System zur Leistungsfähigkeit des alten aufschließen und dieses in einigen Punkten sogar entscheidend übertreffen.

Der Widerspruch schlechterer Einzelwirkungsgrad = besserer Gesamtwirkungsgrad löst sich auf, wenn man erkennt, dass durch den Einsatz dieses Getriebes die Systemeigenschaften des Gesamtsystems Antriebsstrang deutlich verbessert werden konnten, obwohl einzelne Systemkomponenten in Teilbereichen schlechtere Eigenschaften als zuvor aufweisen. Der Motor kann stets im verbrauchs- oder im leistungsoptimalen Punkt betrieben werden. Dies überkompensiert den geringeren Einzelwirkungsgrad. Gleichzeitig wird das Komfortverhalten signifikant verbessert. Nur durch die ganzheitliche Betrachtung des Antriebsstrangs, die Kenntnisse der Stärken und Schwächen der Systemkomponenten und die gezielte Abstimmung der Komponenten aufeinander konnten diese Verbesserungen erzielt werden.

3.4 Potenzial

Die Nachteile wie Wirkungsgradverluste durch radialen Schlupf im Umschlingungsbogen und Verluste durch die erforderlichen Nebenaggregate bieten erheblichen Raum für Verbesserungen. So wird eine Erhöhung der Scheibensteifigkeit dazu führen, dass der radiale Einlauf des Kettenbolzens und die damit verbundenen Verluste verringert werden. Weitere Verbesserungen treten ein, wenn ein höherer zulässiger Auslegungsreibungswert des geschmierten Kontakts erreicht wird: einerseits kann bei gleichbleibenden Leistungsdaten des Getriebes die Anpresskraft zwischen den Scheiben geringer sein und damit können auch die verlustbehafteten Nebenaggregate entsprechend kleiner dimensioniert werden. Andererseits kann der höhere Auslegungsreibungswert dazu genutzt werden, die Leistungsdaten des Getriebes

zu erhöhen und es ist möglich, diese Getriebevariante auch für stärker motorisierte Fahrzeuge anzubieten.

Der Einsatz neuer, verbesserter Konstruktionswerkstoffe an entscheidenden Stellen kann den Wirkungsgrad des Systems CVT–Getriebe also deutlich verbessern, wenn es gelingt, damit das tribologische Verhalten des Friktionskontaktes entscheidend zu verbessern. Damit liegt ein erhebliches Potenzial für neue Lösungen vor, die durch gezielte Forschungsarbeiten ermöglicht werden können.

3.5 Umsetzung

Die Einführung neuer Konstruktionswerkstoffe bedingt eine Vielzahl von Testläufen zum Nachweis ihrer Eignung für diesen Einsatz und zur Identifikation der für die Auslegung relevanten Parameter. Die Wettbewerbssituation fordert, dass die Produkte schnell und effizient entwickelt werden. Daraus lässt sich ableiten, dass Vorversuche kostengünstig und mit geringem Aufwand durchgeführt werden müssen. Hierfür sind besonders Modellprüfstände oder Simulationsrechnungen geeignet, mit denen Werkstoff- und Bauteilkombinationen unter definierten, abstrakten Bedingungen getestet werden können. Dabei ist wichtig, dass die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus den Modellversuchen auf den späteren Einsatzfall im Gesamtsystem sichergestellt ist. Dieser neue und leistungsfähige Produktentwicklungsprozess erfordert eine enge Verflechtung der Arbeiten auf Modellprüfständen – zur grundsätzlichen Untersuchung des Tribosystems und Werkstoffverhaltens – mit den systemorientierten Arbeiten auf Bauteilprüfständen – die den Einfluss des gestalteten Maschinensystems und seiner Randbedingungen berücksichtigen – sowie den theoretischen Arbeiten auf der Basis komplexer Modelle und Simulationsrechnungen – die sowohl einer Optimierung der Systemgestalt als auch einer Verallgemeinerung der Erkenntnisse auf ähnliche technische Systeme dienen.

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 483 der Deutschen Forschungsgemeinschaft „Hochbelastete Gleit– und Friktionssysteme auf Basis ingenieurkeramischer Werkstoffe“ an der Universität Karlsruhe werden in enger Zusammenarbeit dreier Teilprojekte die Grundlagen erforscht, um beispielhaft für höchstbeanspruchte geschmierte Friktionskontakte die bisherigen Stahl–Kegelscheiben des CVT–Getriebes durch Keramik–Kegelscheiben zu ersetzen.

4 Forschungsumfeld

Seit Januar 2000 ist dieser Sonderforschungsbereich an der Universität Karlsruhe etabliert. Dort werden an exemplarisch ausgewählten Bauteilen bzw. Systemen die notwendigen Ingenieurwerkzeuge zum Einsatz keramischer Werkstoffe unter hoher tribologischer und mechanischer Beanspruchung durch zielgerichtete, interdisziplinäre Zusammenarbeit entwickelt. Der Sonderforschungsbereich ist in folgende vier Projektbereiche gegliedert:

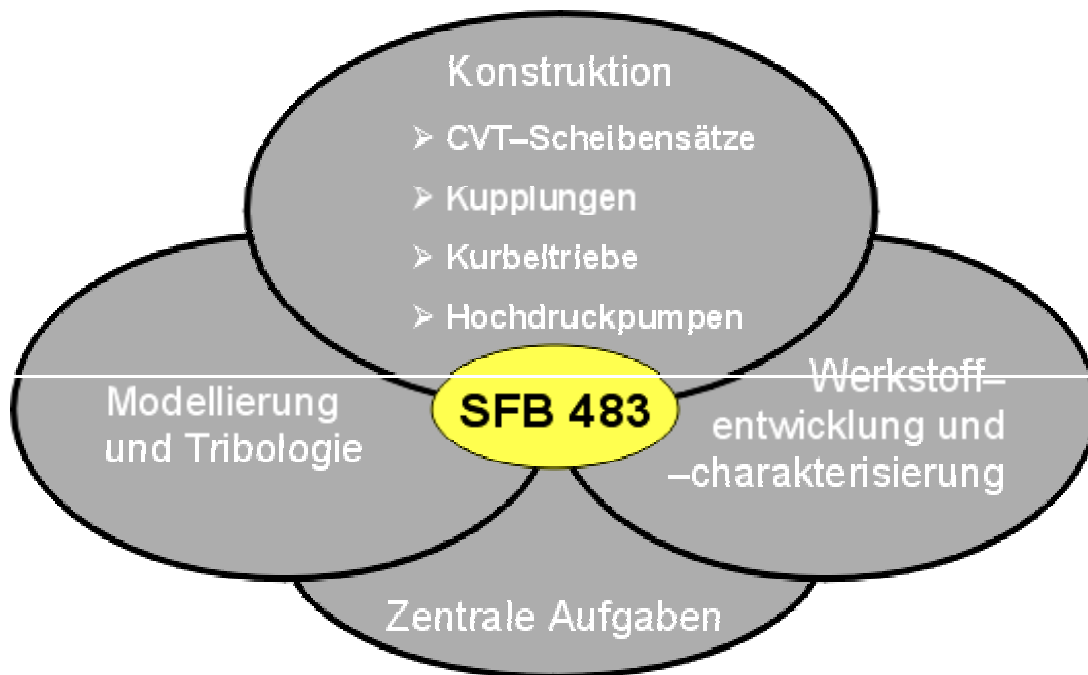


Abbildung 2: Untergliederung SFB 483

Die Ingenieurkeramiken wie Aluminiumoxid, Siliciumcarbid oder Siliciumnitrid zeichnen sich durch hohe Härte, Steifigkeit, chemische und thermische Beständigkeit und niedrige Dichte aus. Diese Eigenschaften können bei Weiterentwicklung und konkreter konstruktiver Umsetzung bewusst genutzt werden, um eine deutliche Verbesserung des gewünschten Systemverhaltens zu erzielen. Beispielsweise kann durch möglichen Verzicht auf Schmiermittel oder durch Übergang auf Mediensmierung ein signifikanter ökologischer Vorteil erreicht werden. Ähnliche Potenziale bieten sich auf technischem Gebiet - die höheren Leistungsdichten und thermischen Belastungsgrenzen versprechen kleinere Baugrößen und höhere Wirkungsgrade.

Innerhalb der konstruktiv orientierten Projekte werden die keramischen Werkstoffe an ausgewählten Systemen auf Komponentenprüfständen erprobt. Diese sind:

- Scheibensätze für kontinuierlich verstellbare Getriebe (CVT)
- Trockene Reibkupplungen
- Kurbeltriebe für mediengeschmierte Pumpen
- Hochdruckpumpen für direkteinspritzende Ottomotoren

Es wird erwartet, dass diese Systeme ein hohes Potenzial zur Übertragung auf andere Anwendungen besitzen und dass die wissenschaftliche Durchdringung der gesamten Prozesskette die Akzeptanz der Ingenieurkeramik in anspruchsvollen Produkten fördert. Diese Prozesskette umfasst die Bereitstellung der notwendigen Auslegungswerkzeuge, bauteilspezifische Abstimmung der Werkstoffe, neue Prüftechniken sowie Qualitätssicherung und zieht sich bis zu der Realisierung prototypischer Bauteile.

4.1 CVT–Bauteilprüfstand

Um das Systemverhalten des geschmierten Friktionskontaktes mit keramischen Werkstoffen untersuchen zu können, wird in einem Basisprojekt des SFB ein neuer Prüfstand mit einem Modellgetriebe aufgebaut.

4.1.1 Verknüpfung mit anderen Teilprojekten

Dieses Modellgetriebe dient auch dazu, die aus der numerischen Simulation abgeleiteten werkstoffgerechten Modifikationen der Ausgangsgeometrie des Scheibensatzes zu verifizieren. Ebenfalls werden hiermit die modifizierten Randschichten der Keramikscheiben auf die Haltbarkeit und den Reibwert im praktischen Einsatz hin untersucht. Aufgrund unterschiedlicher tribochemischer Wechselwirkungen ist besonders bei Grenz- und Mischreibung ein Einfluss der gepaarten Werkstoffe und der fertigungsbedingten Oberflächenqualität zu erwarten. Weiterhin wird das Einlauf- und Übergangsverhalten (Reibwert und Verschleißintensität) in Abhängigkeit von der Laufzeit und Pressung ermittelt.

4.1.2 Konzept

Es wurde ein Prüfgetriebe konzipiert, das sich zur Zeit im Aufbau befindet und mit dem hochpräzise Messungen von relevanten Größen wie Kettengeschwindigkeit,

Anpresskräften, Drehzahlen und Drehmomenten durchgeführt werden können. Am An- und Abtrieb befinden sich zwei hochdynamische Servo-Synchronmaschinen, mit je 112 kW Leistung und 300 Nm Nennmoment. Damit können reale Drehzahlungleichförmigkeiten eines Verbrennungsmotors bis 250 Hz nachgebildet werden.

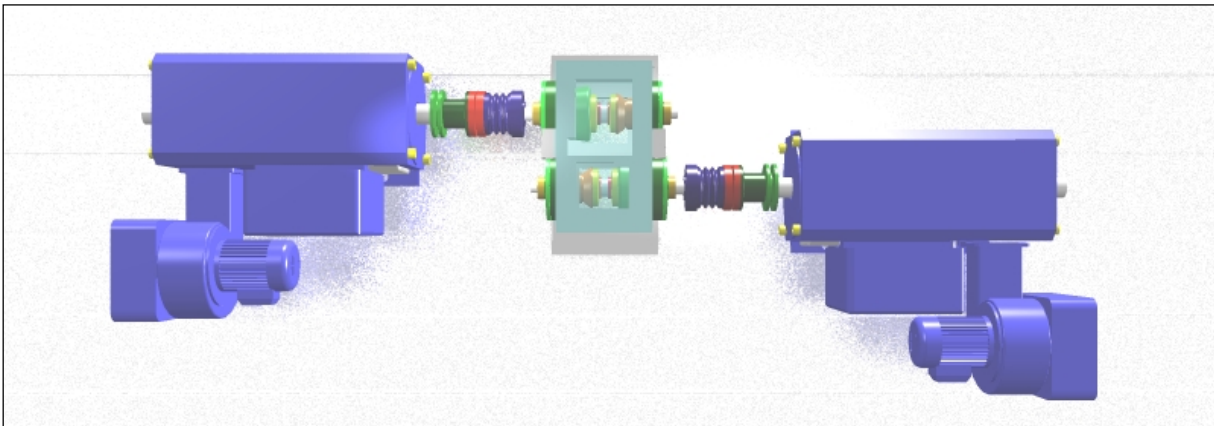


Abbildung 3: Ansicht des Prüfgetriebes mit Antriebs- und Bremsmaschine

In einer ersten Phase werden grundsätzliche Parameteruntersuchungen und Sensitivitätsstudien an unmodifizierten keramischen Kegelscheiben aus Aluminiumoxid (F99,7– Al_2O_3) durchgeführt. Als Umschlingungsmittel dient zunächst die Wiegedruckstückekette der Firma LuK GmbH & Co., die auch im Audi A6 multitronic eingesetzt wird. Die grundsätzliche Durchführbarkeit des Projekts wurde im Vorfeld über eine interne Machbarkeitsstudie belegt.

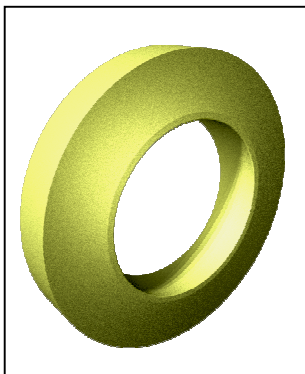


Abbildung 4: Keramikscheibe

Links ist die Al_2O_3 -Scheibe komplett und rechts im Verbund mit dem Scheibenträger dargestellt. Die Geometriedaten: 110/65/20 ($\varnothing_A / \varnothing_I / B$, in mm).

Der Kegelwinkel beträgt 10° .

Die Scheibe ist an der Rückseite über hochfesten Klebstoff mit dem Träger

verbunden.

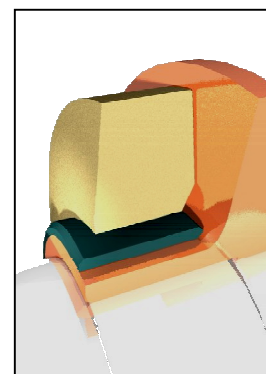


Abbildung 5: Scheibe im Verbund

4.2 Erste Ergebnisse

Im Rahmen von Forschungsarbeiten werden am Institut für Werkstoffkunde II Modell-Tribometerversuche von $100\text{Cr}6/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Gleitpaarungen unter variierten

Belastungsparametern durchgeführt. Bei den Versuchen war die Schmierung auf ein Minimum reduziert, um Bedingungen der Misch- oder Grenzreibung zu untersuchen.

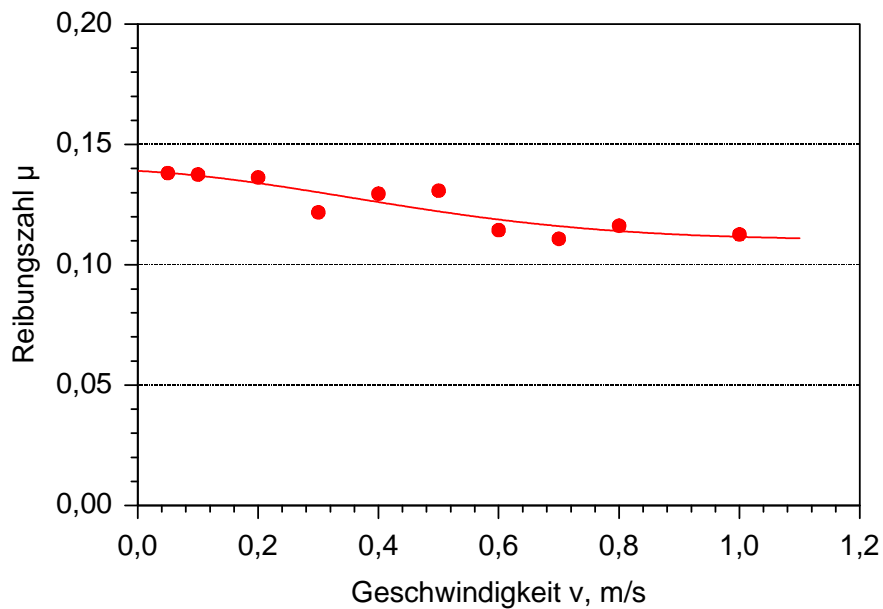


Abbildung 4: Reibungszahl in Abhängigkeit der Gleitgeschwindigkeit

Paarung: 100Cr6–Kugel/Al₂O₃–Scheibe: $F_N = \text{konst. (5N)}$, $v = \text{variiert}$, FVA Öl Nr.3, RT.

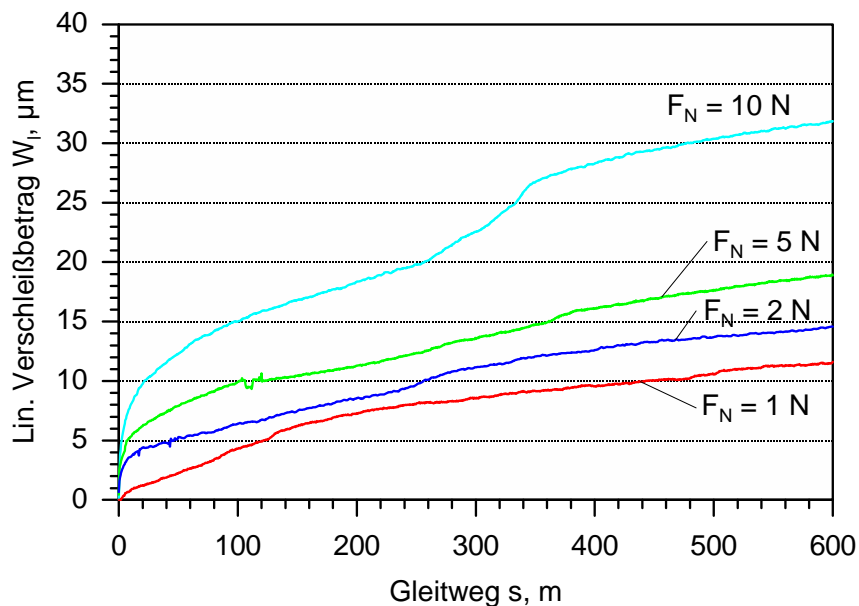


Abbildung 5: Linearer Verschleißbetrag in Abhängigkeit von Gleitweg und Normalkraft

Paarung: 100Cr6–Kugel/Al₂O₃–Scheibe:

$v = \text{konst. (0,5 m/s)}$, $F_N = 1, 2, 5, 10 \text{ N}$, FVA Öl Nr.3, RT

4.2.1 Interpretation

Diese ersten Messergebnisse, die mit einem nicht additivierten Öl, mit handelsüblicher Al_2O_3 -Keramik und mit dem Standard-Werkstoff 100Cr6 durchgeführt wurden, zeigen bereits akzeptables tribologisches Verhalten, insbesondere eine konstante Reibungszahl zwischen 0,11 und 0,14. Allerdings bieten geeignete Modifizierungsmaßnahmen ein wichtiges Potenzial für Verbesserungen.

5 Nächste Schritte

5.1 Auswahl der geeigneten Werkstoffmodifikation

Ein keramischer Konstruktionswerkstoff kann durch Variation von Parametern der Pulverzusammensetzung und -aufbereitung, des Sintervorgangs und der Hartbearbeitung in unzähligen Modifikationen mit verschiedensten mechanischen und in der Gleitpaarung daraus resultierenden tribologischen Eigenschaften hergestellt werden. Die Identifikation der für den jeweiligen Anwendungsfall am besten geeigneten Modifikation ist experimentell und durch Modellierung zu untersuchen.

Die Struktur eines Sonderforschungsbereichs ist für diese komplexe Aufgabe besonders geeignet, da das gesammelte Wissen mehrerer Institute mit unterschiedlichen Schwerpunkten zur Verfügung steht.

Ausgehend von der unmodifizierten Al_2O_3 -Keramik muss zunächst die Übertragbarkeit der Versuche von tribologischen und bruchmechanischen Modellprüfständen auf die Versuche im Bauteilprüfstand CVT-Getriebe sichergestellt und die relevanten Parameter identifiziert werden. Im Anschluss daran werden Geometrie-, Oberflächen- und Randschichtmodifikationen der Gleitpaarungen, die bei Untersuchungen auf den Modellprüfständen die gewünschten Eigenschaften gezeigt haben, in den Bauteilprüfstand übertragen und dort in Bezug auf Reibwert, Haltbarkeit, Geräusch- und Komfortverhalten hin untersucht.

5.2 Werkzeuge für keramikgerechtes Konstruieren

Das Konstruieren mit keramischen Werkstoffen erfordert ein vollständiges Umdenken des Konstrukteurs. Insbesondere können Gestaltungsrichtlinien für konventionelle metallische Bauteile nicht auf die Keramik übertragen werden. Die Empfindlichkeit des Werkstoffs Keramik gegenüber Zugspannungen und die aufwändige Endbe-

arbeitung aufgrund der hohen Härte legen nahe, dass Keramiken nur an ausgewählten Stellen in Verbindung mit metallischen Konstruktionswerkstoffen eingesetzt werden. Das Vorhandensein geeigneter Werkzeuge für den Konstruktionsprozess ist eine entscheidende Voraussetzung für eine breite Akzeptanz dieser in konstruktiven Anwendungen neuartigen Werkstoffe. Aus diesem Grund wird im Rahmen des Sonderforschungsbereichs ein Expertensystem aufgebaut, das den Konstrukteur bei der Auswahl und der Gestaltung keramischer Komponenten und deren Integration in den metallischen Konstruktionsverbund unterstützen wird. Basis für dieses System ist einerseits eine exakte Abbildung des bruchmechanischen Verhaltens der keramischen Werkstoffe und andererseits das bisher verfügbare und zu validierende Wissen auf diesem speziellen Gebiet.

6 Fazit

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 483 soll beispielhaft am stufenlosen Automatikgetriebe gezeigt werden, wie durch den gezielten Einsatz von Keramik als Friktionswerkstoff im hochbelasteten geschmierten Kontakt das Systemverhalten in Bezug auf Wirkungsgrad, Fehlertoleranz und Leistungsdichte weiter verbessert werden kann. Damit wird die Basis erforscht, um neue leistungsfähige Produkte auf der Basis Ingenieurkeramik unter Marktrandbedingungen zu entwickeln. Diese Forschungsarbeiten werden einen wichtigen Beitrag zur weiteren Verbreitung der Ingenieurkeramik als Konstruktionswerkstoff leisten und damit in der späteren Umsetzung der Forschungsergebnisse in die industrielle Praxis eine Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit unterstützen. Die im Sonderforschungsbereich beispielhaft umgesetzte, enge Zusammenarbeit von Werkstoffentwicklung, tribologischer Grundlagenuntersuchung und gezielter Forschung an komplexen technischen Systemen wird dabei grundlegende Erkenntnisse zur Entwicklung eines neuen keramikorientierten Produktentwicklungsprozesses für höchstbeanspruchte technische Systeme schaffen.

Danksagung: Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung der vorgestellten Arbeiten im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 483 „Hochbelastete Gleit- und Friktionssysteme auf Basis ingenieurkeramischer Werkstoffe“.