

Verbesserung des Systemverhaltens von trocken laufenden und geschmierten Friktionssystemen durch Ingenieurkeramische Werkstoffe

Albert Albers, Asli Arslan, Andreas Stuffer, IPEK - Institut für Produktentwicklung
Universität Karlsruhe (TH)

1. Einleitung

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 483 wird unter anderem das Potenzial von ingenieurkeramischen Werkstoffen in trockenen und in geschmierten Friktionssystemen aufgezeigt. Exemplarisch für diese Systeme werden die Kfz-Kupplung und ein stufenlos verstellbares Getriebe (CVT) als Demonstratoren untersucht, da beide hohe Anforderungen an die Systeme stellen [1].

Von modernen Kfz-Kupplungen werden aufgrund der heutigen Verbrennungsmotoren die immer größer werdende Drehmomente zur Verfügung stellen, höhere Leistungsdichten bei begrenztem Bauraum gefordert. Dabei stoßen herkömmliche ungeschmierte Friktionpaarungen an ihre Grenzen. Eine hohe Leistungsdichte wird durch eine hohe Reibungszahl und hohe zulässige Flächenpressung in den Wirkflächenpaaren [2] des tribologischen Systems erzielt. Des Weiteren wandeln Kupplungen prinzipbedingt kinetische Energie durch Reibung in Wärmeenergie um. Sie können ihre Funktion also nur erfüllen, wenn die Bedingungen wie hohe Wärmeabfuhr an die Umgebung, hohe Wärmekapazität und hohe Temperaturbeständigkeit der Reibpartner realisiert werden können. Der heutige Fahrzeugbau stützt sich weitgehend auf organische Belagwerkstoffe. Um Reibungszahlen von 0,27 - 0,3 zu erreichen, erlauben sie nur relativ niedrige Temperaturbelastungen ($\leq 250^\circ\text{C}$ in der Reibfläche) und maximale Flächenpressungen von 0,25 - 0,4MPa. Gewünscht werden jedoch deutlich höhere Reibungszahlen und zulässige Flächenpressungen. Aufgrund der erweiterten gesetzlichen Anforderungen bezüglich der in diesen Werkstoffen zulässigen Einsatzstoffe – z. B. keine Schwermetalle – ist es schwierig den organischen Belag in Richtung höhere Reibungszahl, Temperaturfestigkeit und zulässige Flächenpressung weiter zu entwickeln. Reibungszahlen von $\mu = 0,4 - 0,7$ und eine hohe zulässige Betriebstemperatur von über 800°C haben Sintermetallbeläge auf Basis von Kupfer- und vor allem Eisenlegierungen. Aufgrund des ungünstigen Schaltkomforts werden sie nur im Bereich Scheiben-/Trommelbremsen und Hauptkupplungen für schwere Nutzfahrzeuge eingesetzt [1, 3, 4]. Kohlenstofffaserverstärkter Kohlenstoff (CFC) und Verbundkeramiken konnten sich aufgrund ihrer hohen Werkstoff- und Herstellungskosten nur im Rennsport, Flugzeugbau und Oberklassenfahrzeugen behaupten.

Als möglicher Lösungsansatz bieten sich die monolithischen, keramischen Werkstoffe an. Wegen der hohen Reibungszahl und hohen zulässigen Flächenpressung ist theoretisch eine hohe Leistungsdichte zu erwarten. Die in diesem Beitrag gezeigten Ergebnisse der Untersuchungen mit den Werkstoffen Al_2O_3 , SiC in Paarung mit 100Cr6 zeigen das Potenzial der ingenieurkeramischen Werkstoffe im trockenen Friktionssystem. Aufgrund der hohen Steifigkeit und Härte, der geringen Bruchzähigkeit und der spezifischen tribologischen Eigenschaften der Keramik stellt die Integration der technischen Keramik in ein komplexes technisches System eine große Herausforderung dar. Hier wird eine neue konstruktive Designlösung (Kupplungen) vorgestellt.

Der konstruktionsmethodische Ansatz zur Systemsynthese wird am Beispiel der Integration einer keramischen Kegelscheibe dargestellt.

2. Experimentelle Systemuntersuchungen

Um das Systemverhalten der unterschiedlichen Friktionspaarungen zu analysieren, wurden experimentelle Untersuchungen an einem Trockenreibprüfstand durchgeführt. Ermittelt wurden die Reibungszahl und deren Verlauf über der Gleitgeschwindigkeit und die lokale Wirkflächentemperatur der Keramik.

2.1. Friktionswerkstoffe / Friktionspaarungen

Die tribologischen Untersuchungen wurden an den Wirkflächenpaaren $\text{Al}_2\text{O}_3/100\text{Cr6}$ und $\text{SiC}/100\text{Cr6}$ durchgeführt. Der Stahl 100Cr6 wurde mit einer Härte von $180 \pm 5\text{HV}$ eingesetzt. Die Härte der Keramik lag mit 1670 HV (Al_2O_3 : F99,7; Fa. Friatec) und 2500 HV (SiC : EkasicF; Wacker Ceramic) deutlich über der des metallischen Werkstoffs. Die Pellets (Bild 1) wurden mit der unbearbeiteten "as sintered" Oberfläche (Al_2O_3 : $R_z \leq 7,5 \mu\text{m}$; SiC : $R_z \leq 1,9 \mu\text{m}$) verwendet, während die Scheiben plangedreht mit einem R_z -Wert von $\leq 13,6 \mu\text{m}$ eingesetzt wurden. Für die Untersuchung des Oberflächeneinflusses wurden Al_2O_3 -Pellets im polierten Zustand verwendet ($R_z \leq 1,9 \mu\text{m}$).

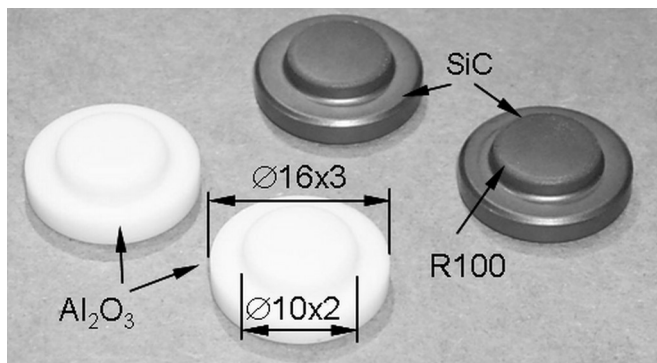


Bild 1: Pelletgeometrie und Abmessungen

2.2. Versuchsaufbau

In Bild 2 ist der Prüfaufbau dargestellt. Der Prüfkopf ist modular aufgebaut. Er erlaubt eine Variation der Reibradien ($R75$, $R84$ und $R93$ mm) und Anzahl der Pellets. In den hier gezeigten Untersuchungen werden die Halter auf einem Radius von $r_m=84$ mm angeordnet. Für Versuche mit 30 Pellets werden die Pellets mit einem Zweikomponenten Epoxydharzklebstoff in eine Halterungen geklebt. Jeweils fünf Pellets werden gleichzeitig linear angefedert (Bild 3). Für Versuche mit 6 Pellets werden die Pellets fest in eine Halterung geschraubt (Bild 3). Hier wird jedes Pellet einzeln angefedert. Der Träger und die Federung sind für beide Versuche identisch.

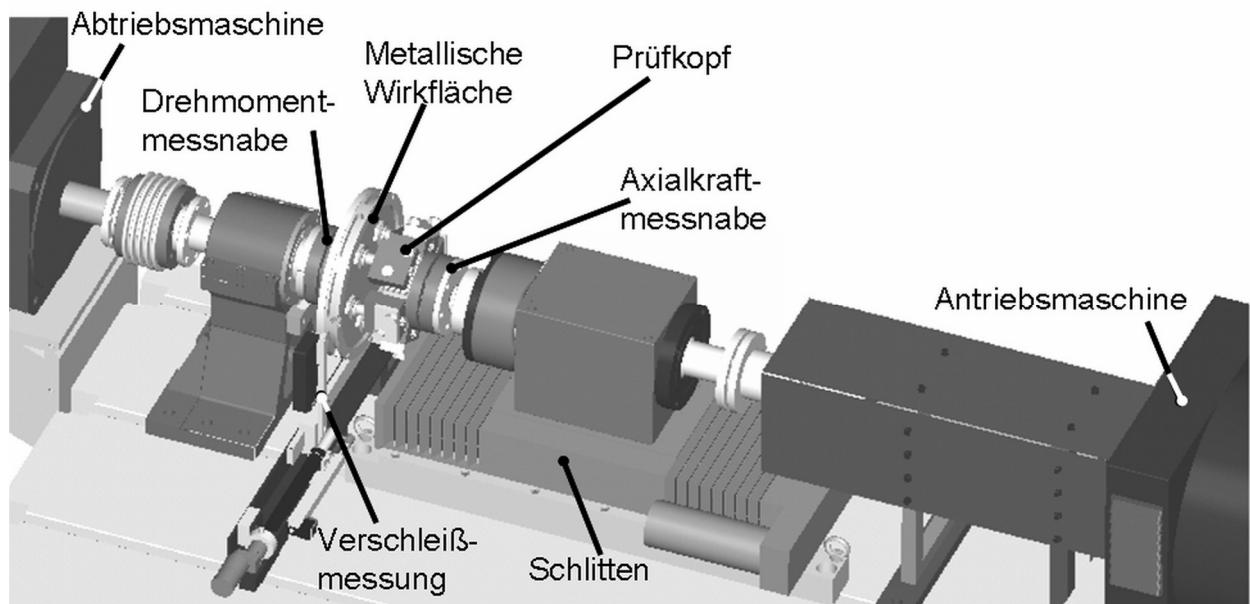


Bild 2: Trockenreibungsprüfstand

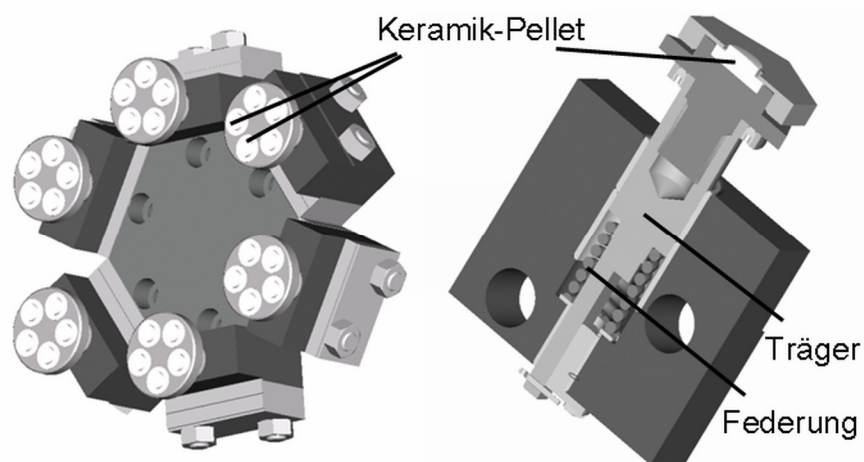
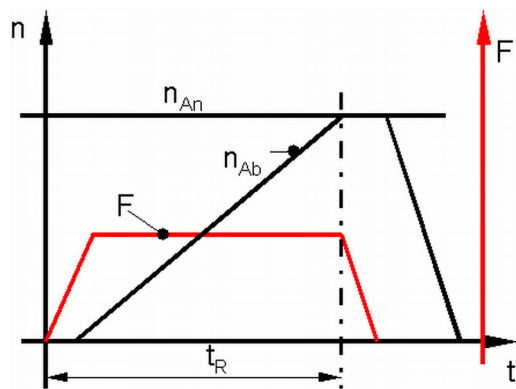


Bild 3: Prüfkopf mit Pellethalterungen

2.3. Versuchsablauf

Zur Ermittlung der Systemeigenschaften des Wirkflächenpaares [2] wurden Versuche mit möglichst beanspruchungsähnlichen Versuchsbedingungen, bezogen auf das Zielsystem Kfz-Kupplung, durchgeführt. Der Schlupf wurde während eines Versuchs beginnend von einem hohen Schlupf stetig auf Null verringert (s. Versuchsablauf 1). Dies entspricht dem Zielsystem.

Versuchsablauf 1 (Bild 4): Der Prüfkopf mit den Pellets beschleunigt auf eine vorgegebenen Antriebsdrehzahl n_{An} . Nach Erreichen der Drehzahl wird die Anpresskraft F (auf Anzahl Pellets verteilt) mittels des schrittmotorbetriebenen Schlittens aufgebracht und die abtriebsseitige Motorwelle auf die Antriebsdrehzahl synchronisiert ($n_{Ab} = 0$ auf $n_{Ab} = n_{An}$). Nach erfolgter Synchronisierung wird das Wirkflächenpaar getrennt ($F = 0$ N) und die Abtriebswelle gestoppt ($n_{Ab} = 0$), um danach den nächste Versuch zu starten.



n_{An} : Antriebsdrehzahl = Drehzahl keramische Wirkflächen

n_{Ab} : Abtriebsdrehzahl = Drehzahl metallische Wirkfläche

n : Drehzahl

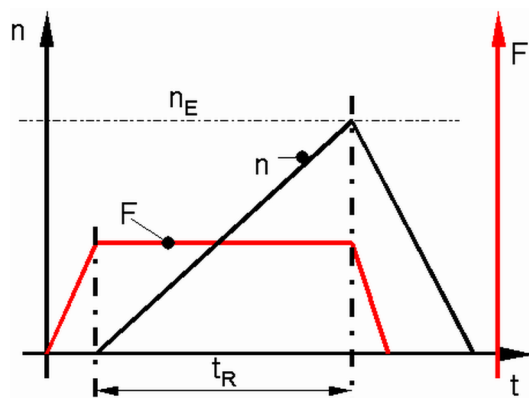
F : Anpresskraft

t_R : Rutschzeit

Bild 4: Schematische Darstellung des Versuchsablaufs 1

Um den Einfluss der Versuchsführung zu untersuchen, wurden des Weiteren Versuche vorgenommen, bei denen der Schlupf während eines Versuchs beginnend von Schlupf gleich Null ständig gesteigert wurde (Versuchsablauf 2). Die Drehzahl der metallischen Wirkfläche ist über die ganze Versuchsdauer gleich 0 U/min.

Versuchsablauf 2 (Bild 5): Nach Aufbringung der Anpresskraft F (auf Anzahl Pellets verteilt) wird der Prüfkopf mit den Pellets mit einer vorgegebenen Beschleunigung in der Rutschzeit t_R auf Enddrehzahl n_E gebracht. Nach Erreichen der Enddrehzahl n_E wird das Wirkflächenpaar getrennt ($F = 0N$). Der nächste Versuch beginnt, wenn der Prüfkopf zum Stillstand gekommen ist.



n_E : Enddrehzahl

n : Drehzahl= Drehzahl keramische Wirkflächen

F : Anpresskraft

t_R : Rutschzeit

Drehzahl metallische Wirkfläche = 0 U/min

Bild 5: Schematische Darstellung des Versuchsablaufs 2

Für Versuchsablauf 1 und 2 wurde mit den Parametern Antriebsdrehzahl n_{An} , Anpresskraft F und spezifische Wärmeenergie jeweils eine vollfaktorielle Versuchsmatrix erstellt. Diese Versuchsmatrizen sind in Tabelle 1 und 2 zu sehen. Daraus ergeben sich unter der Annahme, dass kein Lastmoment und keine Antriebsdrehzahlrückung vorliegt, die in den Spalte 3 (s. Tabellen 1, 2) aufgeführten berechneten (erwarteten) spezifische Wärmeenergien in der Kupplung. Die spezifische Wärmeenergie dieses Systems ist bis um einen Faktor 10 höher als bei einer herkömmlichen Kfz-Kupplung mit organischen Belägen als Reibpartner im Friktionskontakt.

Die spezifischen Wärmeenergien q_k wurden wie folgt berechnet:

Für die Versuche mit 30 Pellets wurde das Massenträgheitsmoment von $J_F = 1 \text{ kgm}^2$ (Mittelklassewagen ohne Beladung) bis $J_F = 2 \text{ kgm}^2$ (Mittelklassewagen mit Beladung) und für die Modellversuche von $J_F = 0,1 \text{ kgm}^2$ bis $J_F = 0,3 \text{ kgm}^2$ variiert.

Mittels dieser Massenträgheitsmomente, der Drehzahl und der Summe der Fläche aller Funktionskontakte in den Wirkflächenpaaren (A_{WFP}) [2] zwischen Pellets und Anpressplatte, werden die spezifischen Wärmeenergien für jeden Versuch berechnet.

$$q_k = \frac{0,5 \cdot J_F \cdot (2 \cdot \pi \cdot n_{An})^2}{A_{WFP}}$$

Die theoretisch zur Verfügung stehende Wirkfläche hat einem Durchmesser von 10 mm. Allerdings ist die aktive Keramikwirkfläche aufgrund des 100 mm Radius (s. Bild 1) geringer. Die Wirkfläche wurde mittels von Voruntersuchungen auf einem Durchmesser von 5 mm festgelegt.

n_{An} [1/min]	F [N]	berechnete spez. Energie [J/mm ²]	Wiederhol. [-]
700	1200	4,6	10
700	1200	5,7	10
700	1200	6,8	10
700	1800	4,6	10
...	10
1100	1200	11,2	10
1100	1200	14,0	10
...	10
1500	2400	31,4	10

Tabelle 1: Versuchsmatrix 1

Die Untersuchung des Einflusses der Oberflächenqualität erfolgte mit dem Aufbau wie in Bild 3 beschrieben und Versuchsablauf 1. Hier wurden 6 Pellethalter auf dem Reibradius $r = 84$ mm angeordnet. Die Versuchsmatrix ist in der folgenden Tabelle 2 dargestellt.

n_{An} [1/min]	F [N]	Berechnete spez. Energie [J/mm ²]	Wiederhol. [-]
700	300	2,3	10
700	300	4,5	10
700	300	6,9	10
700	450	2,3	10
...
1100	300	5,6	10
1100	300	11,3	10
...
1500	600	31,4	10

Tabelle 2: Versuchsmatrix 2

Diese vollfaktorielle Versuchsmatrizen umfassen 27 Einzelversuche. Um eine ausreichende statistische Signifikanz der einzelnen Versuche bezüglich Reibungszahlverlauf zu erhalten, wurden die Versuche jeweils 10 Mal nacheinander wiederholt. Während der Versuche wurden die Anpresskraft (Kraftmessnabe), das Reibmoment (Drehmomentmessnabe) des Prüfkopfs und die Drehzahlen (Drehgeber) kontinuierlich aufgezeichnet.

Die thermographischen Aufnahmen der keramischen Wirkfläche erfolgten mit Versuchsablauf 2. Um einen direkten Einblick auf die Pelletoberfläche zu erhalten, wurde in den Scheiben eine Bohrung eingelassen (s. Bild 6). Die Bohrung hatte an der Wirkfläche einen Durchmesser von 3 mm.

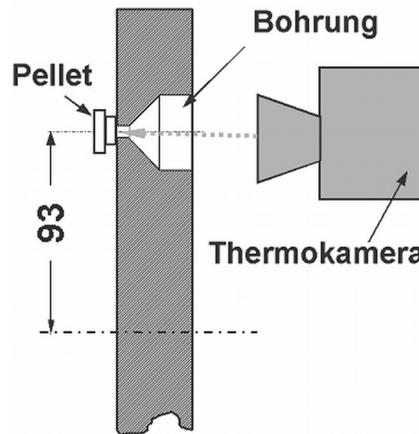


Bild 6: Prinzip der Temperaturmessung

2.4. Ergebnisse

In den Bildern 7a-b wird exemplarisch der Einfluss der unterschiedlichen Versuchsführung am Beispiel der Systemreibpaarungsuntersuchung $\text{Al}_2\text{O}_3/100\text{Cr6}$ und $\text{SiC}/100\text{Cr6}$ mit einer Anpresskraft von $F = 2400 \text{ N}$, einer Enddrehzahl n_{An} bzw. $n_{\text{E}} = 1500 \text{ U/min}$ und einer spezifischen Energie von $20,9 \text{ J/mm}^2$ gezeigt. Es sind die Reibungszahlen über die Gleitgeschwindigkeit dargestellt. Die Versuche mit der Versuchsführung 1 beginnen mit hohem Schlupf (Gleitgeschwindigkeit) bzw. hohem Energieeintrag in das System. Versuchsführung 2 beginnt dagegen mit Gleitgeschwindigkeit $v_{\text{G}} = 0$. Hier ist der Energieeintrag zu Beginn des Versuches gering. Die Versuche mit der Versuchsführung 2 weisen eine höhere Reibungszahl bei niedrigen Gleitgeschwindigkeiten auf als die Versuche mit Versuchsführung 1. Des Weiteren zeigen die Bilder 7 a-b dass die Friktionspaarung $\text{SiC}/100\text{Cr6}$ eine höhere Reibungszahl und einen für das Kfz-Kupplungssystem geeigneteren Reibungszahlgradienten [1, 5] aufweist, als die Friktionspaarung $\text{Al}_2\text{O}_3/100\text{Cr6}$.

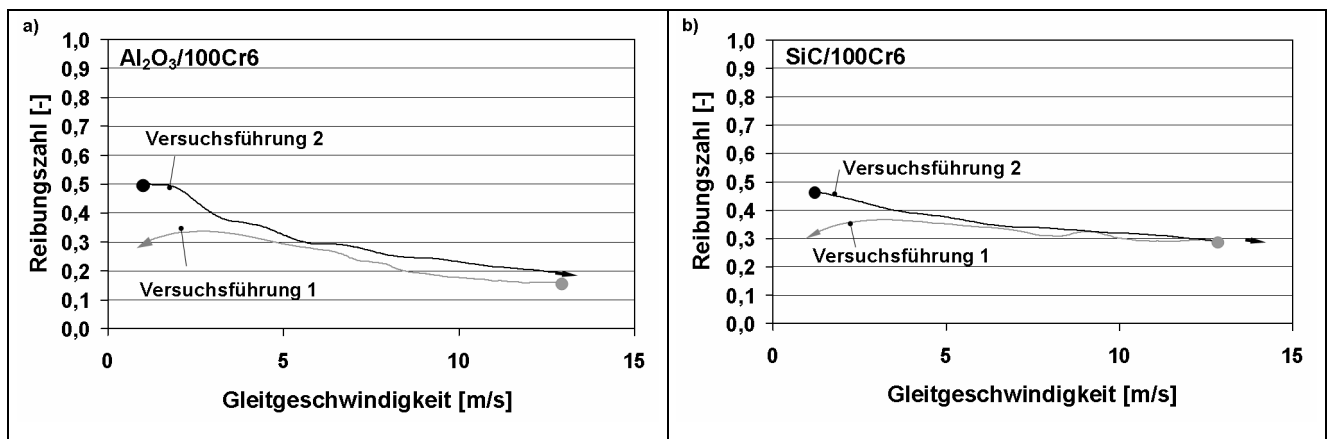


Bild 7 a-b: Exemplarische Darstellung des Einflusses unterschiedlicher Versuchsführungen auf den Reibungszahlverlauf.

In Bild 8 ist die Reibungszahl über der Gleitgeschwindigkeit, bei unterschiedlichen Systemreibpaarungen $\text{Al}_2\text{O}_3/100\text{Cr6}$ und $\text{SiC}/100\text{Cr6}$ (1500 U/min; 20,9 J/mm²; 2400 N) mit gleicher Versuchsführung „1“ aufgetragen. Diese Darstellung zeigt, dass mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit die Reibungszahl bei beiden Friktionspaarungen fällt. Des Weiteren weist die Systemreibpaarung $\text{SiC}/100\text{Cr6}$ eine höhere Reibungszahl und einen geringeren Reibungszahlgradienten auf als die Systemreibpaarung $\text{Al}_2\text{O}_3/100\text{Cr6}$.

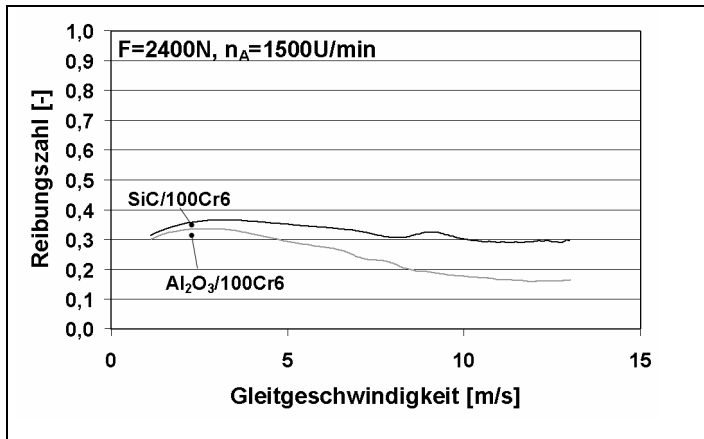


Bild 8: Reibungszahl über der Gleitgeschwindigkeit, bei unterschiedlichen Systemreibpaarungen $\text{Al}_2\text{O}_3/100\text{Cr6}$ und $\text{SiC}/100\text{Cr6}$ (1500U/min; 20,9J/mm²; 2400N) (Versuchablauf 1).

Die Bilder 9 a-b zeigen den Einfluss der Anpresskraft bei gleicher Antriebsdrehzahl (1100 U/min). Der Einfluss der Anpresskraft (1200 N, 1800 N und 2400 N) ist bei unterschiedlichen Energiestufen ($q_K = 11,2 \text{ J/mm}^2$ bzw. $16,9 \text{ J/mm}^2$) vernachlässigbar. Dominierend ist aber für den hier untersuchten Bereich der Anpresskräfte die Abhängigkeit der Reibungszahl von der Gleitgeschwindigkeit [6].

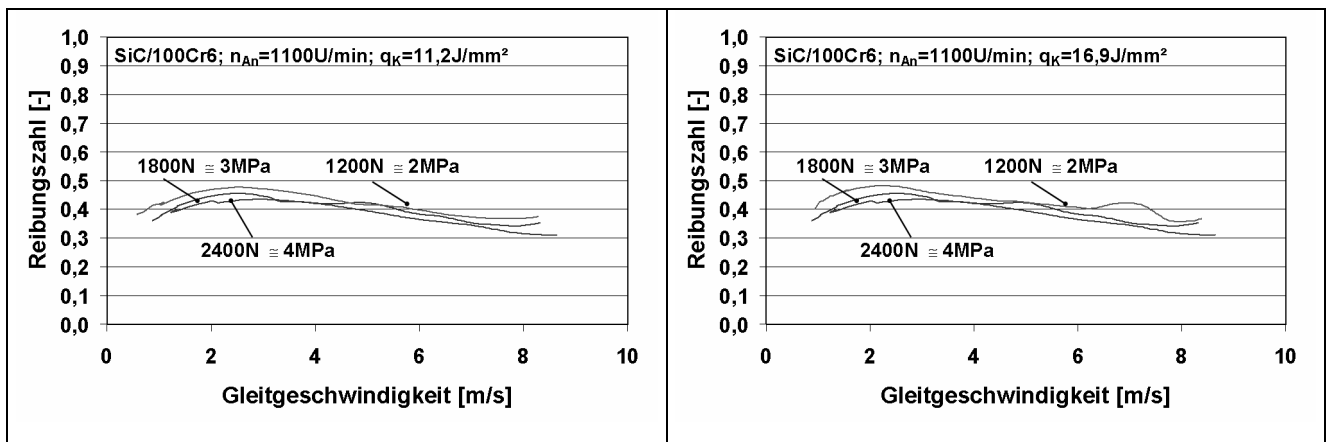


Bild 9 a, b: Reibungszahlverlauf über Gleitgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Anpresskräften (Versuchablauf 1).

Die Bilder 10 a-c zeigen den Einfluss der Oberflächenrauigkeit bei gleicher Anpresskraft (450 N) und gleichen Antriebsdrehzahlen (700, 1100 bzw. 1500 U/min). Untersucht wurden jeweils 6 Pellets mit unterschiedlichen Oberflächen („as sintered“ $R_z = 7,5 \mu\text{m}$, „poliert“ $R_z = 1,9 \mu\text{m}$) mit dem Versuchsablauf 1. Es ist ein Einfluss der Oberqualität bei geringen Gleitgeschwindigkeiten zu erkennen ($\Delta\mu = 0,1$). Dieser Einfluss nimmt mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit bzw. bei höheren Energiestufen ab.

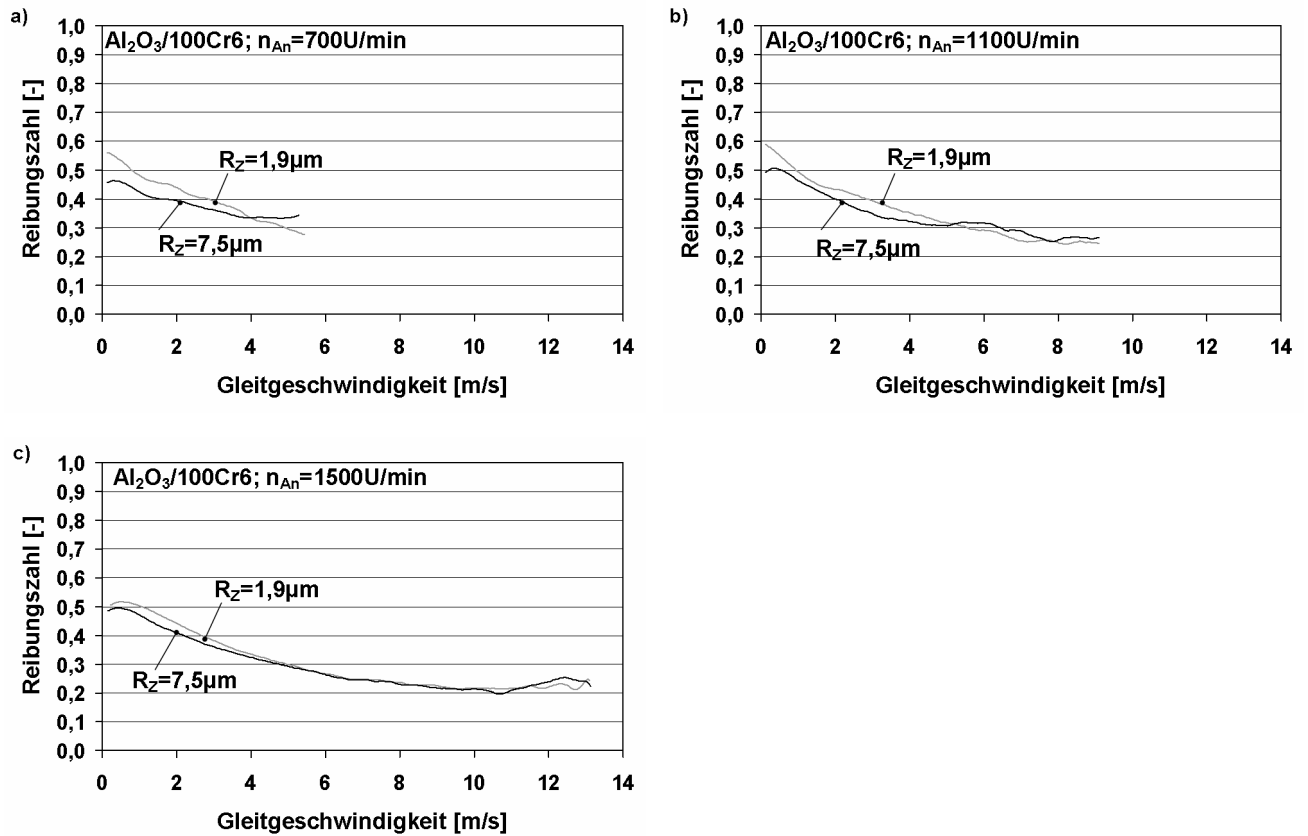


Bild 10 a-c: Reibungszahlverlauf über Gleitgeschwindigkeit bei gleicher Anpresskraft ($F = 450\text{N}$) und gleichen Antriebsdrehzahlen (700, 1100 bzw. 1500 U/min). (Versuchablauf 1).

In den Bildern 11 a-b ist die Temperaturverteilung auf der Pelletoberfläche der Reibpaarung SiC/100Cr6 in einer Sequenz dargestellt, bei Drehzahl ($n_E = 1100\text{U/min}$), Anpresskraft ($F = 600\text{N}$) und spez. Energie ($q_K = 5,6\text{J/mm}^2$). Die mittlere Oberflächentemperatur beträgt im kreisförmigen Messbereich ca. 150°C . Die maximalen Flashtemperaturen liegen bei ca. 240°C .

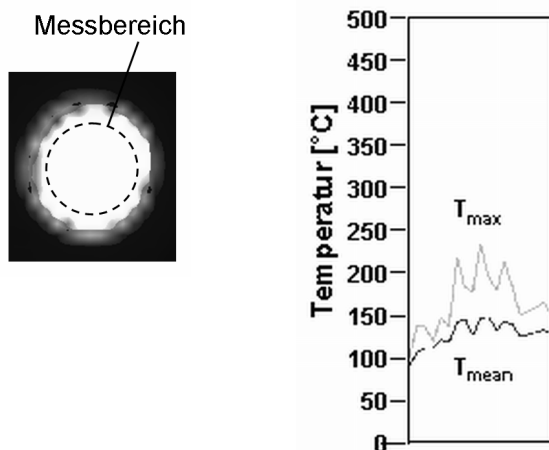


Bild 11 a-b: Exemplarische Thermographieaufnahme und der zeitliche maximale und mittlere Temperaturverlauf der Systemreibpaarungen SiC/100Cr6.

3. Konstruieren mit Ingenieurkeramiken und die Auswirkungen auf das System

Ingenieurkeramische Werkstoffe zeichnen sich durch hohe Temperaturbeständigkeit, Druckfestigkeit, Steifigkeit und Härte bei vergleichsweise geringer Dichte aus. Diese Vorteile in Bezug auf Pressung und Temperatur gehen mit Nachteilen wie geringere Biege-, Scher- und Zugbeanspruchbarkeit einher. Des Weiteren stellt die Einbindung der Keramik in eine metallische Umgebung eine hohe Herausforderung an die Konstruktion dar. So führen z. B. unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten zu temperaturabhängigen Pressungen bzw. konstruktiven Spielen in den Kontaktbereichen der Wirkflächenpaare.

Würde der bisherige organische Kupplungsbelag-Ring durch Keramik nachgebildet, würden Verformungen durch Temperaturgradienten und fertigungsbedingte Parallelitätsabweichungen zu Biegespannungen im Keramikring bei geschlossener Kupplung führen. Außerdem ist der tragende Oberflächenanteil während der Schlupfphase durch die geringe Nachgiebigkeit und damit „Anpassungsfähigkeit“ der Keramik klein. Aus diesen Gründen kann der bei den meisten Kupplungen übliche ringförmige Belag nicht direkt durch eine Ingenieurkeramik ersetzt werden. Dies zeigt die Auswirkung der Werkstoffwahl auf die konstruktive Gestalt. Als erster Lösungsansatz wurde daher ein Pelletdesign entwickelt, das in den hier beschriebenen Untersuchungen verwendet wird [1, 6].

Bild 12 zeigt ein Beispiel einer Gesamtsystemlösung. In diesem Konzept sind die Keramikpellets zweireihig auf der Schwungscheibe und Anpressplatte ungefedert angeordnet. Die Federung erfolgt durch die zwei metallischen Bleche. Diese Lösung hat den Vorteil, dass das Massenträgheitsmoment der Abtriebswelle sehr gering gehalten werden kann [7], und der Bauraumbedarf geringer (\varnothing 210 mm statt \varnothing 294 mm) als bei einer herkömmlichen Kfz-Kupplung ist. Ein Nachteil ist, dass aufgrund der geringen Masse der Bleche und der geringen Wärmeleitfähigkeit der Al₂O₃-Keramik (30 W/m K bei 100 °C), die Wärme nicht schnell genug aus dem Friktionskontakt geleitet werden kann. Deshalb kommt es in der Mittelebene des Gesamtsystems zu einem „Wärmestau“.

Damit die Wärme besser aus dem Friktionskontakt abgeführt werden kann, müssen die Pellets auf der Trägerscheibe befestigt werden. Bild 13 zeigt ein Konzept, bei dem dies umgesetzt ist. Der Vorteil ist wie oben schon erwähnt eine bessere Wärmeabfuhr nach Außen und der geringe Bauraum. Der Nachteil ist, dass das Massenträgheitsmoment der Abtriebswelle den maximal ertragbaren Wert eines 5-Gang-Getriebes von 0,008kgm² [7] überschreitet. An der Lösung dieser Problematik wird derzeit gearbeitet.

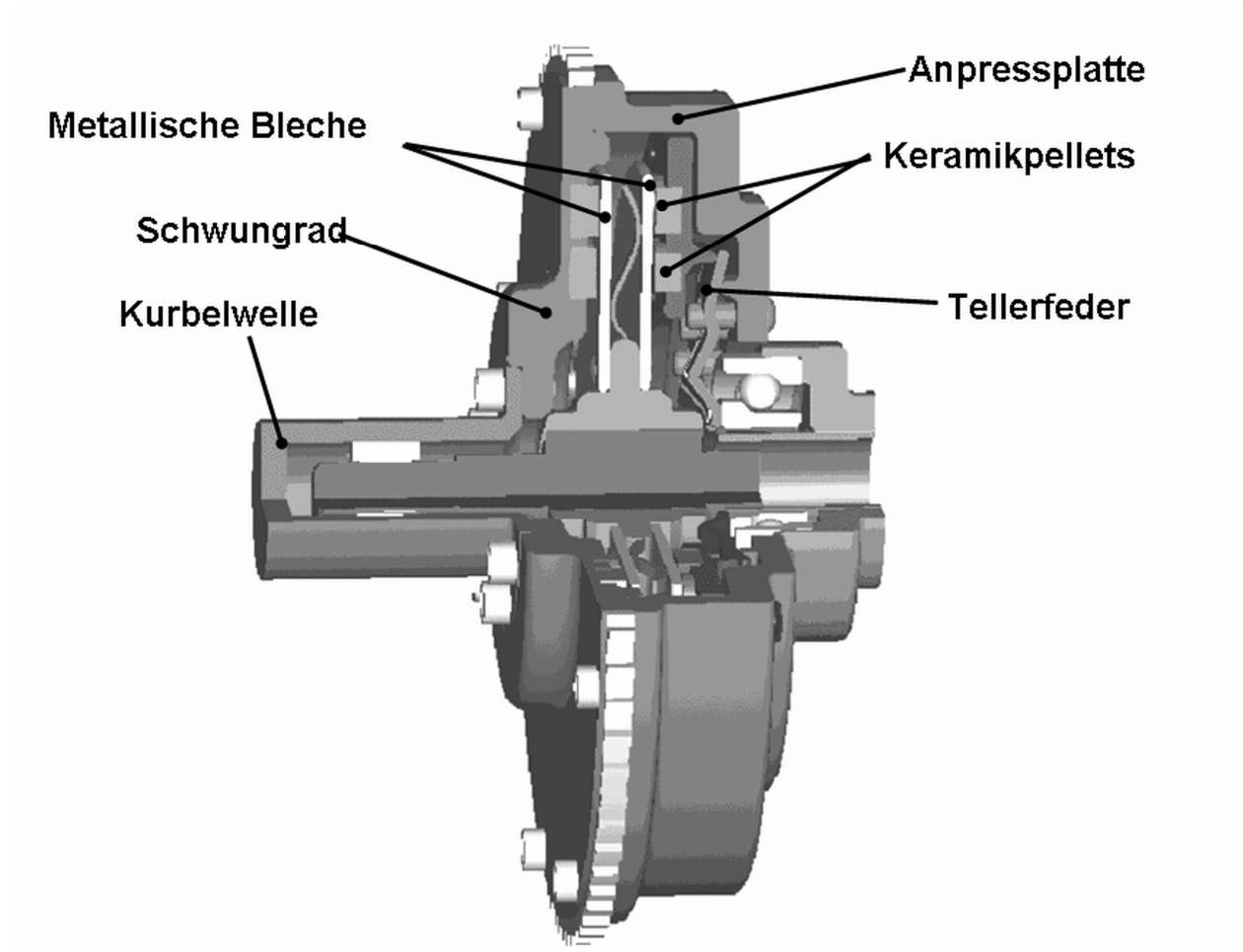


Bild 12: Konzept einer Kfz-Kupplung mit einer Keramik/Metall-Frictionspaarung. Anordnung der Pellets zweireihig auf der Schwungscheibe und Anpressplatte.

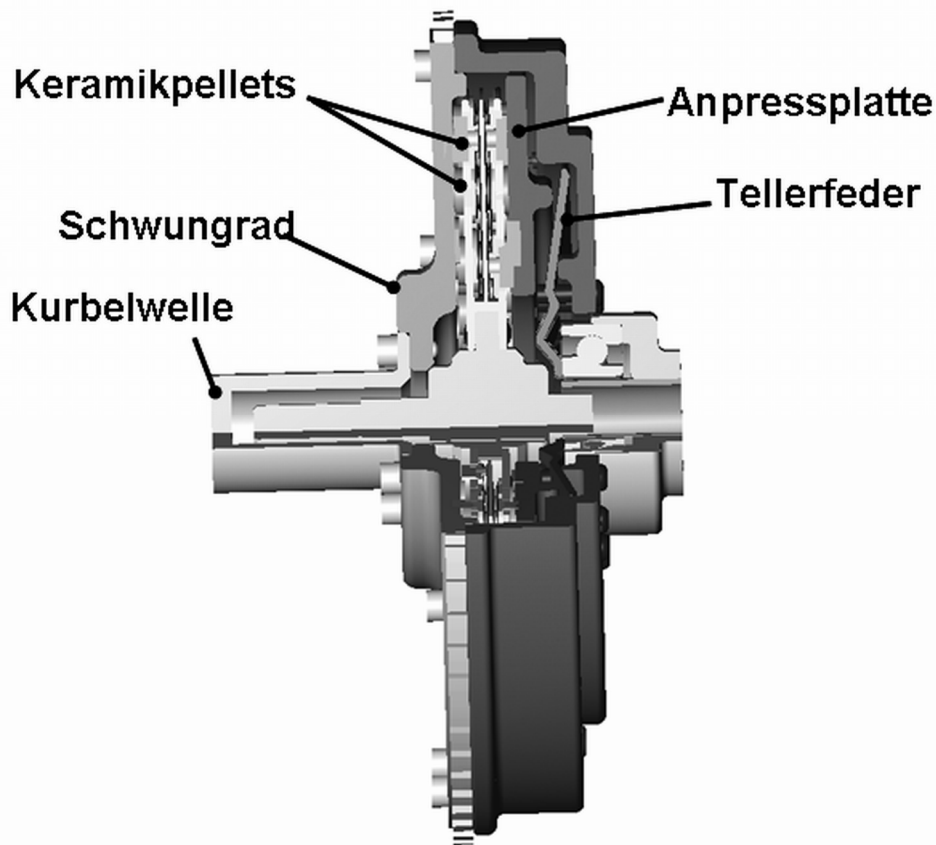


Bild 13: Konzept einer Kfz-Kupplung mit einer Keramik/Metall-Frictionspaarung. Anordnung der Pellets dreireihig Trägerscheibe.

Daraus folgt, dass es für die Konzipierung neuer Systemlösungen wichtig ist, tiefere Erkenntnisse über den Wärmehaushalt der Kupplung zu gewinnen. Aus diesem Grund werden in weiteren Arbeiten detaillierte FEM-Modelle zu den konstruktiven Lösungsvarianten erstellt. Hieraus werden die thermischen und mechanischen Beanspruchungen der Ingenieurkeramiken im Konstruktionsverbund und das Betriebsverhalten der Kupplungsvarianten unter den Randbedingungen der thermomechanischen Verformungen der Komponenten abgeleitet. Die Validierung des Modells erfolgt anhand der Ergebnisse aus den experimentellen Untersuchungen.

Zusammenfassung trocken laufende Friktionssysteme

Die experimentellen und konstruktiven Ergebnisse zeigen, dass ingenieurkeramische Werkstoffe ein hohes Potenzial im Bereich der trocken laufenden Friktionssysteme haben. Die Reibungszahlcharakteristik (fallende Reibungszahl über Gleitgeschwindigkeit führt zu selbst erregten Rupschwingungen [5]) ist im Hinblick auf Komfort für die Kraftfahrzeugkupplung ungünstig. In weiteren Forschungsarbeiten wird durch Randschichtmodifikationen der Keramikoberfläche die Reibungszahlcharakteristik derart verbessert, dass das Friktionssystem auch für Kfz-Kupplungssysteme geeignet ist. Des Weiteren wurde aufgezeigt, dass es wichtig ist, die Versuchsführung der experimentellen Untersuchungen so systemnah wie möglich zu wählen, um genauere Aussagen auf das Zielsystem zu erhalten.

4. Konstruktionsmethodischer Ansatz zur Systemsynthese am Beispiel von geschmierten Friktionssystemen

2.5. Methoden

Contact and Channel Model C&CM

Nach Albers [2] kann die Funktion eines technischen Systems mithilfe des Contact and Channel Modell C&CM erklärt werden. Damit kann ein System vereinfacht werden, um es zu analysieren oder es kann eine gewünschte Funktion innerhalb eines technischen Systems synthetisiert werden. Dabei sind Wirkflächenpaare (WFP) diejenigen Oberflächen fester Körper, die am Energie-, Stoff- oder Informationsaustausch des technischen Systems beteiligt sind. Diese Wirkflächenpaare sind untereinander durch Leit-Stütz-Strukturen (LSS) verbunden.

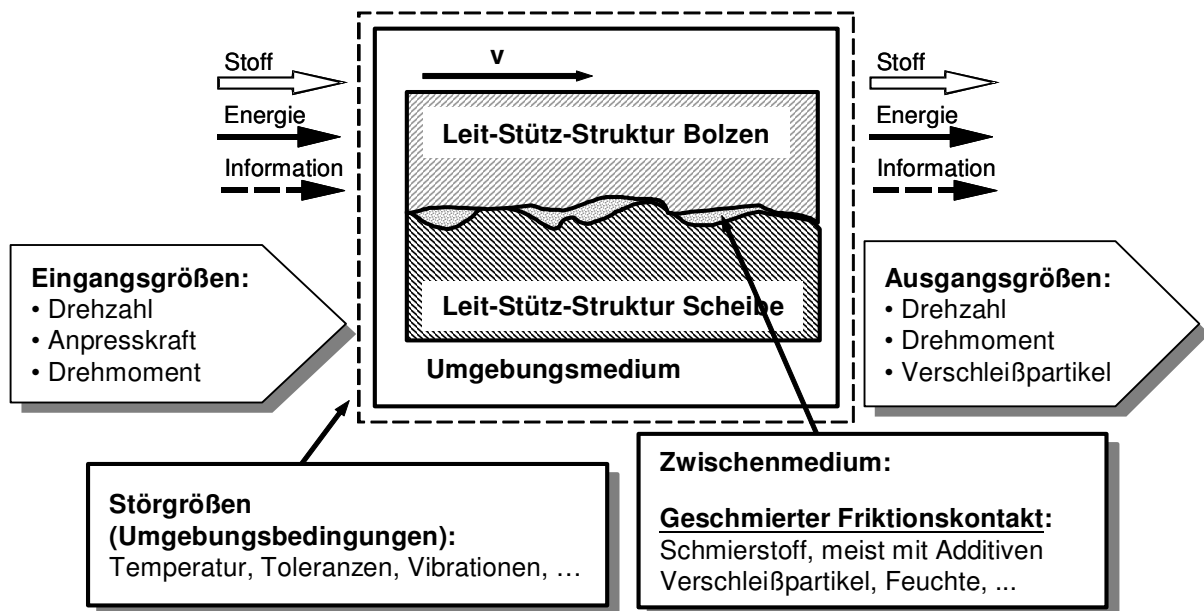


Bild 14: Tribologisches System nach C&CM [2]

Angepasster Produktentwicklungsprozess

Das betrachtete System CVT-Getriebe wird zunächst für die werkstoffgerechte Integration der Ingenieurkeramik gemäß dem C&CM abstrahiert. Dadurch kann das Hauptaugenmerk auf die maßgeblichen Funktionsstrukturen und – Oberflächen gelegt werden. Damit wird eine Vorfizierung in Bezug auf Gestaltung und Gestalt vermieden. Diese Theorie beruht auf drei Hauptthesen. Die erste ist, dass ein Grundelement eines technischen Systems seine Funktion nur in Wechselwirkung mit mindestens einem weiteren Grundelement des Systems erfüllt. Die korrekte Funktion – und damit der beabsichtigte Effekt – wird durch den Kontakt einer Wirkfläche mit einer weiteren Wirkfläche erzeugt. Diese Oberflächen werden zu Wirkflächen (WF) und bilden je ein Wirkflächenpaar. Die Lage der Wirkflächenpaare wird durch Leit-Stütz-Strukturen bestimmt. Zweitens benötigt die Umsetzung einer technischen Funktion durch ein technisches System mindestens zwei Wirkflächenpaare jeweils an den Schnittstellen zu den

angrenzenden Teilsystemen sofern keine Volumeneffekte wie zum Beispiel Trägheitskräfte für die technische Funktion genutzt werden. Dritte These ist, dass diese Wirkflächenpaare und Leit-Stütz-Strukturen in unbegrenzter Anzahl und Form in einem System vorhanden sein können.

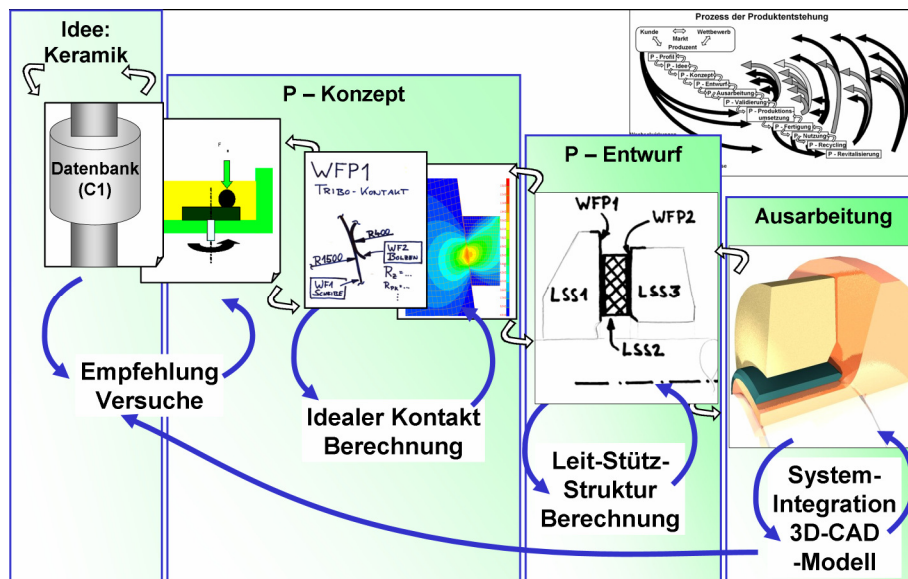


Bild 15: Produktentstehungsprozess angepasst an Ingenieurkeramische Werkstoffe (Ausschnitt)

Sobald das System entsprechend abstrahiert ist, kann der keramikspezifische Konstruktionsprozess für komplex belastete Systeme wie in Bild 15 dargestellt ablaufen. Aus Vorauswahltests und Datenbanken werden Friktionspaarungen empfohlen, die hinsichtlich Werkstoff und Oberflächenfeinstruktur für die gewünschten Anforderungen im System Erfolg versprechen. Daraus wird ein „idealer Kontakt“ formuliert und mit Hilfe von Finiten-Element-Analysen unter Berücksichtigung der gewünschten Funktion, der Eigenschaften der Oberfläche (WF) sowie dem oberflächennahen Bereich berechnet. Daraus erhält man die funktionsoptimale Lage und Form der Wirkflächen. Bei der Ausgestaltung werden diese Wirkflächenpaare durch Leit-Stütz-Strukturen untereinander verbunden, von denen jede auf Ausfallsicherheit überprüft wird. Dadurch werden mögliche Lösungen erzeugt, mit denen die Anforderungen erfüllt werden. Die vorgeschlagenen Lösungen werden auf ihre Empfindlichkeit hinsichtlich Belastungsparameter wie z. B. Normalkraft und Temperaturen untersucht. Andere Bewertungskriterien sind Umsetzbarkeit, erwartete Abweichung von Geometrie- und Oberflächeneigenschaften in Abhängigkeit der Komplexität der vorgeschlagenen Lösung und der projektierten Kosten.

2.6. Restriktionen

Das Systemverhalten eines CVT-Getriebes wird maßgeblich durch die Eigenschaften des Wirkflächenpaares Kegelscheibe – Kettenbolzen beeinflusst [8]. Wichtige Parameter sind hierbei Geometrie, Werkstoffeigenschaften, Oberflächenbeschaffenheit und die Effekte des Schmierstoffs als Zwischenmedium. Bei der Gestaltung der Kegelscheiben für das Demonstrator-Getriebe sind folgende Restriktionen eingeflossen:

- Außendurchmesser maximal 130 mm wegen Bauraumbeschränkungen in den Prozessstufen, wurde auf 110 mm beschränkt, um sicheren Prozess zu gewährleisten
- Kegelwinkel 10° aus den Randbedingungen

- Innendurchmesser von 65 mm um eine möglichst steife Welle zu erhalten
- Einfache Geometrie, um eine reproduzierbare Qualität auf hohem Niveau zu erhalten

2.7. Eingesetzte Werkstoffe

Es wurde entschieden, die im Serieneinsatz verwendete Originalkette mit Kettenbolzen aus 100Cr6 einzusetzen. Voruntersuchungen an Modellprüfständen haben gezeigt, dass die Paarung mit Aluminiumoxid (Al₂O₃, F 99,7) ein gewünschtes Verhalten zeigt. Der Werkstoff selbst zeichnet sich durch gute mechanische Eigenschaften wie hohe Druckfestigkeit, geringe Dichte und hoher E-Modul bei relativ geringen Kosten aus.

2.8. Erstellen der Leit-Stütz-Strukturen

Die geltenden Restriktionen ergeben zusammen mit den eingesetzten Werkstoffen bereits eine enge Definition der Form und Lage der Friktionswirkfläche. Die Leitstützstruktur dient dazu, der Wirkfläche eine ausreichende Unterstützung zu geben. Aus Gründen der Einfachheit wurde eine kreisringähnliche Form gewählt. Zum Verbinden der Ingenieurkeramik mit der Systemumgebung müssen die folgenden Funktionen erfüllt und über Wirkflächenpaare dargestellt werden:

- Kräfte übertragen → WFP zur Energieübertragung
- Lage festlegen → WFP zur Informationsübertragung

Die LSS 1 und die keramische Kegelscheibe haben unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten. Dadurch werden die Anforderungen an die Verbindung zwischen Kegelscheibe und Systemumgebung ausgeweitet. Hinzu kommt, dass die Verbindung die unterschiedlichen Ausdehnungen ausgleichen muss. Unten (Bild 16) sind zwei verschiedene Vorschläge dargestellt, die beide die oben genannten Anforderungen erfüllen.

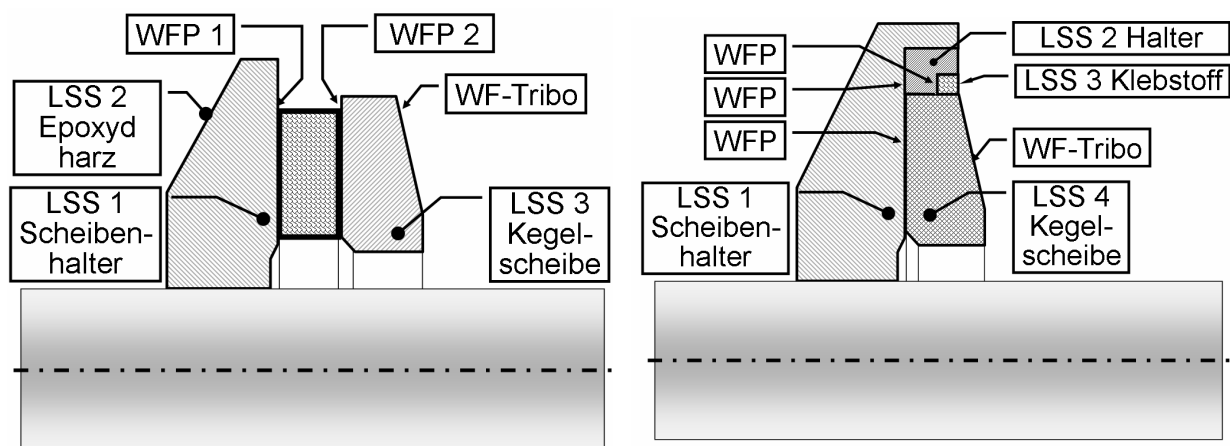


Bild 16: Integration der Kegelscheibe in die Systemumgebung, Version 1 links, Version 2 rechts

Bei Version 1 (links) sind beide Funktionen in der Leit-Stütz-Struktur 2 (LSS 2) zusammengefasst, indem ein Hochleistungsklebstoff verwendet wird. Während des Aushärtvorgangs wird die Hauptfunktion „Lage festlegen“ von einer Zentrierhilfe erfüllt, die später entfernt wird. Dadurch wird die Funktion „Lage festlegen“ an den Epoxydharzklebstoff übertragen. Die LSS 2 muss zusätzlich zum Leiten der Kräfte von der Friktionswirkfläche (WF-Friktion) der Kegelscheibe über das WFP 1 und WFP 2 die unterschiedlichen Ausdehnungen

des Stahls (LSS 1) und der Keramik (LSS 3). Die im Bild rechts gezeigte Version 2 unterscheidet sich von der linken dadurch, dass die Hauptfunktionen zur Eingliederung der Kegelscheibe getrennt bleiben. Der Halter (LSS 2) definiert die radiale Position der Kegelscheibe und nimmt die radialen Kräfte auf. Über eine zusätzliche Klebefuge wird sichergestellt, dass das volle Drehmoment auch bei höheren Temperaturen übertragen werden kann, bei denen die Pressung in der Fuge der Schrumpfverbindung Halter – Scheibe aufgrund der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten abnimmt.

Beide vorgestellten Lösungen wurden umgesetzt und erprobt. Sie zeigen unterschiedliche Vor- sowie Nachteile: Version 1 würde sich für einen automatisierten Montageprozess eignen, weil nur wenige Schritte erfolgen müssen. Ebenso wird dabei wenig Bauraum benötigt. Die Version 2 hingegen ist besser für den Einsatz im Prüfmodul geeignet, weil die Kegelscheiben leicht montiert und demontiert werden können.

Es ist zu beobachten, dass bei Einsatz der Paarung Keramik–Stahl bei gleicher Anpresskraft ein deutlich höheres Drehmoment übertragen werden kann. Ebenso ist der Gradient der Kurven steiler. Diese Steigungen können in „Systemreibungszahlen“ umgerechnet werden. Beim Übergang von Stahl–Stahl zu Stahl–Keramik erhöht sich diese auf 160%.

Zusammenfassung geschmierte Friktionssysteme

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass der sich Übergang zu einer veränderten Friktionspaarung das Systemverhalten in Bezug auf die Effizienz positiv auswirkt. Bei gleicher Anpresskraft kann ein bis zu 60% höheres Drehmoment übertragen werden. Der Gesamtwirkungsgrad des Systems CVT-Getriebe steigt, da die Verlustleistungen durch den Einsatz kleinerer Nebenaggregate verringert werden können. Das Verschleißverhalten muss allerdings für konkret umzusetzende Lösungen noch verbessert werden.

5. Literatur

- [1] A. Albers; A. Arslan; D. Herbst: Keramik für den Einsatz in Bremsen und Kupplungen. ATZ- Automobiltechnische Zeitschrift 103 (2001) H. 5, 414-419.
- [2] A. Albers, S. Matthiesen: Konstruktionsmethodisches Grundmodell zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion technischer Systeme, Konstruktion, 7/8 2002, (2002), S. 53–59
- [3] J. Gramberger; K.-D. Löcker: Trockenlaufende Sinterreibbeläge. Antriebstechnik 28 (1989) 11, S. 68-75.
- [4] M. Fischer: Potenziale und Grenzen der PKW-Trockenkupplung. VDI Berichte Nr. 1610, 2001, S. 203-222.
- [5] A. Albers, D. Herbst. Schwingungen in Reibkupplungen - Ursachen, Auswirkungen, Abhilfen VDI-Berichte 1568, Düsseldorf (2000) S. 273-295
- [6] J. Schneider, K.-H. Zum Gahr, A. Arslan, A. Albers: Untersuchungen an ungeschmierten Keramik/Metall - Gleitpaarungen im einsinnigen Gleitkontakt im Hinblick auf Anwendungen in Friktionssystemen. Tribologie Fachtagung 2001; Reibung, Schmierung und Verschleiß; Bd. II, GfT, Gesellschaft für Tribologie e.V., S. 57/1-57/10.

[7] G. Lechner; Fahrzeuggetriebe : Grundlagen, Auswahl, Auslegung und Konstruktion / G. Lechner ; H. Naunheimer. - Berlin ; Heidelberg : Springer, 1994

[8] Albers, A., Stuffer, A.: Investigations on high performance – ceramic as friction material in a continuously variable transmission (CVT), Current Advances in Mechanical Design & Production VIII, Giza (Egypt), 04.-06. Jan. 2004, S. 145-151

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Finanzierung der vorgestellten Arbeiten im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 483 "Hochbelastete Gleit- und Friktionssysteme auf Basis ingenieurkeramischer Werkstoffe".