

Potenzialabschätzung von Belägen aus monolithischer Keramik in trockenlaufenden Friktionssystemen und die Auswirkungen auf die Systemkonstruktion

A. Arslan, A. Albers

Universität Karlsruhe (TH), Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kfz-Bau

Im Teilprojekt A2 werden tribologische Untersuchungen am Trockenreibprüfstand, mit Pellet/Scheibe-Geometrie unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen an den Friktionskontakt im Kupplungssystem durchgeführt. Hierbei besteht eine enge Kooperation mit dem Teilprojekt B2. Während in Teilprojekt B2 Untersuchungen am Modellprüfstand erfolgen, sind die Versuche in Teilprojekt A2 in einer weniger abstrahierten Prüfstufe - an das „reale“ Kupplungssystem angepasst - angesiedelt [1].

Die experimentellen und konstruktiven Ergebnisse haben gezeigt, dass ingenieurkeramische Werkstoffe ein hohes Potenzial im Bereich der trockenlaufenden Friktionssysteme haben. Durch geeignete Wahl der Systemreibpaarung und eine keramikgerechte Konstruktion ist es nach ersten Abschätzungen möglich, die Kfz-Kupplung um 53% kleiner zu bauen bzw. bei gleicher Größe bis zu 180% höhere Drehmomente zu übertragen [2, 3]. Die Reibungszahlcharakteristik (fallende Reibungszahl über Gleitgeschwindigkeit) ist im Hinblick auf Komfort (selbsterregte Rumpfschwingungen [4]) für die Krafffahrzeugkupplung ungünstig. Durch Randschichtmodifikationen der Keramikoberfläche in Teilprojekt B2 wird die Reibungszahl auf ein Kupplungssystem geeignete Charakteristik entwickelt.

1. Einleitung

Heutige Krafffahrzeuge werden trotz wachsender Leichtbau-Aktivitäten immer schwerer. Um trotz Zusatzgewicht keine Einbußen in der Fahrdynamik hinnehmen zu müssen, wird von den Antrieben eine steigende Leistung gefordert, bei z. T. gleichzeitiger Verringerung des Bauraums. Aufgrund dieser Tendenz steigen die Anforderungen unter anderem auch bei den Kupplungssystemen.

Die Leistungsdichte der im heutigen Fahrzeugbau eingesetzten Kupplungssysteme mit Wirkflächenpaaren [5], organischer Belag und metallische Gegenwirkfläche werden durch die organischen Beläge bestimmt. Um Reibungszahlen von 0,27 - 0,3 zu erreichen, erlauben sie nur relativ niedrige Temperaturbelastungen (= 250°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 – macht es schwierig den organischen Belag in Richtung höhere Reibungszahl, Temperaturfestigkeit und zulässige Flächenpressung weiter zu entwickeln. Sintermetallbeläge auf Basis von Kupfer- und vor allem Eisenlegierungen zeichnen sich durch eine Reibungszahl

von $\mu = 0,4 - 0,7$ und eine hohe zulässige Betriebstemperatur von über 800°C aus. Allerdings wird diese Paarung aufgrund ihres ungünstigen Schaltkomforts nur im Bereich Scheiben-/Trommelbremsen und Hauptkupplungen für schwere Nutzfahrzeuge eingesetzt [6-8]. 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 monolithische Keramiken an.

Ziel dieses Teilprojekts ist es, gemeinsam mit den Teilprojekten des Projektkreises Kupplung das tribologische und konstruktive Potenzial der ingenieurkeramischen Werkstoffe im trockenen Friktionssystem aufzuzeigen und zu optimieren. Als Demonstrator wurde die Kraftfahrzeugkupplung gewählt, da diese hohe Anforderungen an das Friktionssystem stellt.

2. Friktionswerkstoffe und experimentelle Methoden

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

2.1 Friktionswerkstoffe

Die tribologischen Untersuchungen wurden an den Wirkflächenpaaren $\text{Al}_2\text{O}_3/100\text{Cr6}$, $\text{SiC}/100\text{Cr6}$, $\text{Al}_2\text{SiO}_5/100\text{Cr6}$, gewebeverstärkte $\text{C}/\text{SiC}/100\text{Cr6}$ (SGL Brakes GmbH; wird in der realen Anwendung mit einem org. Belag gepaart) und organischer Belag/100Cr6 (Industriekupplung) durchgeführt. Die beiden letzteren Paarungen dienen ausschließlich zur Potentialeinschätzung der monolithischen Keramik. Der Stahl 100Cr6 wurde mit einer Härte von $180\pm 5\text{HV}$ eingesetzt.

2.2 Prüfstandsbeschreibung

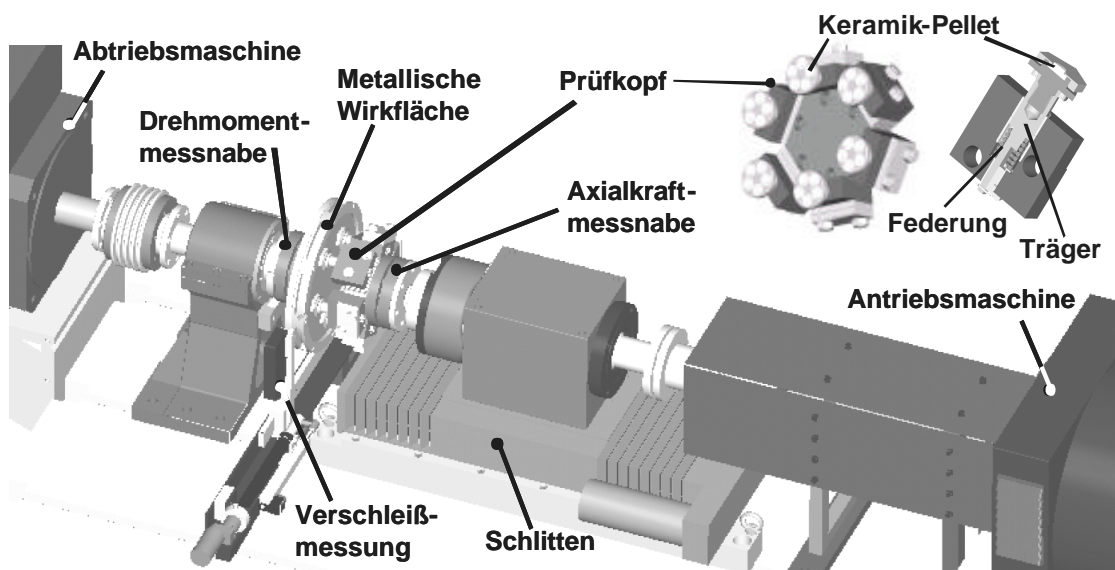


Bild 1: Trockenreibprüfstand

In Bild 1 ist der Prüfstandaufbau dargestellt. Der Prüfkopf ist modular aufgebaut. Er erlaubt eine Variation der Reibradien (R75, R84 und R93mm) und Anzahl der Pellets. In den hier gezeigten Untersuchungen werden die Halter auf einem Radius von $r_m=84\text{mm}$ angeordnet. Für die Versuche werden die Pellets mit einem Zweikomponenten Epoxydharzklebstoff in eine Halterungen geklebt. Jeweils fünf Pellets werden für Versuche mit 30 Pellets gleichzeitig linear angefedert. Bei Versuchen mit 6 Pellets wird jedes Pellet einzeln angefedert. Der Träger und die Federung sind für beide Versuche identisch.

2.3 Versuchsbeschreibung

Zur Ermittlung der Systemeigenschaften des Wirkflächenpaares (WFP) wurden Versuche mit möglichst beanspruchungsähnlichen Versuchsbedingungen, bezogen auf das Zielsystem Kfz-Kupplung, durchgeführt.

Versuchsablauf 1 (Bild 2): Der Prüfkopf mit den Pellets beschleunigt auf eine vorgegebene Antriebsdrehzahl n_{An} . Nach Erreichen der Drehzahl wird die Anpresskraft F (auf Anzahl Pellets verteilt) mittels des schrittmotorbetriebenen Schlitten aufgebracht und die abtriebsseitige Motorwelle auf die Antriebsdrehzahl synchronisiert ($n_{Ab} = 0$ auf $n_{Ab} = n_{An}$). Nach erfolgter Synchronisierung wird das Wirkflächenpaar getrennt ($F = 0\text{N}$) und die Abtriebswelle gestoppt ($n_{Ab} = 0$), um danach den nächsten Versuch zu starten.

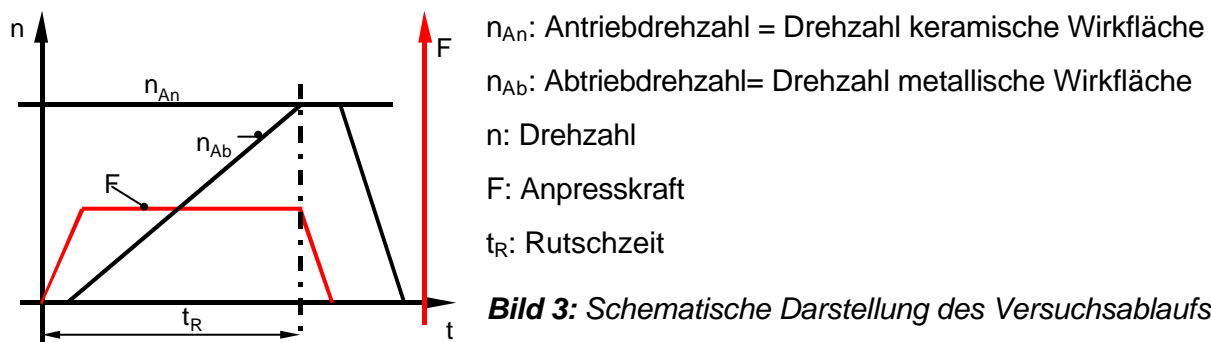


Bild 3: Schematische Darstellung des Versuchsablaufs 1

Versuchsablauf 2 (Bild 3): Nach Aufbringung der Anpresskraft F (auf Anzahl Pellets verteilt) wird der Prüfkopf mit einer vorgegebenen Beschleunigung in der Rutschzeit t_R auf Enddrehzahl n_E gebracht. Nach Erreichen der Enddrehzahl n_E wird das Wirkflächenpaar getrennt ($F = 0\text{N}$). Der nächste Versuch beginnt, wenn der Prüfkopf zum Stillstand gekommen ist.

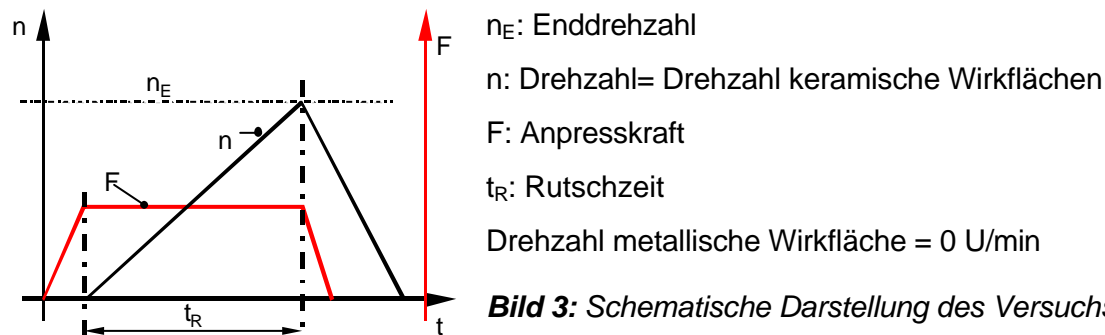


Bild 3: Schematische Darstellung des Versuchsablaufs 2

Für Versuchsablauf 1 und 2 wurde mit den Parametern Antriebsdrehzahl n_{An} , Anpresskraft F und spezifische Wärmeenergie 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 Antriebsmomentendrückung vorliegen, folgende berechneten

2. Statuskolloquium des SFB 483 am 27. Januar 2004 in Karlsruhe

(erwarteten) spezifische Wärmeenergien in der Kupplung q_k (s. Tabelle 1, 2) (Faktor 10 höher als bei einer herkömmlichen Kfz-Kupplung).

Die Untersuchung des Einflusses der Oberflächenqualität erfolgte mit Versuchsablauf 1. Hier wurden 6 Pellethalter mit jeweils einem Pellet auf dem Reibradius $r=84\text{mm}$ angeordnet. Die Versuchsmatrix ist in der Tabelle 2 dargestellt.

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
...	10
1500	2400	31,4	10

Tabelle 1: Versuchsmatrix 1

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
...
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 wurde 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 4). Die Bohrung hatte an der Wirkfläche einen Durchmesser von 3 mm.

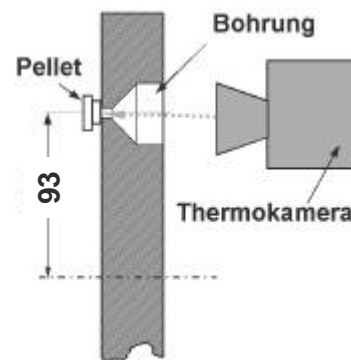


Bild 4: Prinzip der Temperaturmessung

3. Ergebnisse

In den Bildern 5a-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. $n_E = 1500\text{ U/min}$ 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 $v_G = 0$. 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 5 a-b dass die Friktionspaarung SiC/100Cr6 eine höhere Reibungszahl und einen für das Kfz-Kupplungssystem geeigneteren Reibungszahlgradienten [2] aufweist, als die Friktionspaarung $\text{Al}_2\text{O}_3/100\text{Cr6}$.

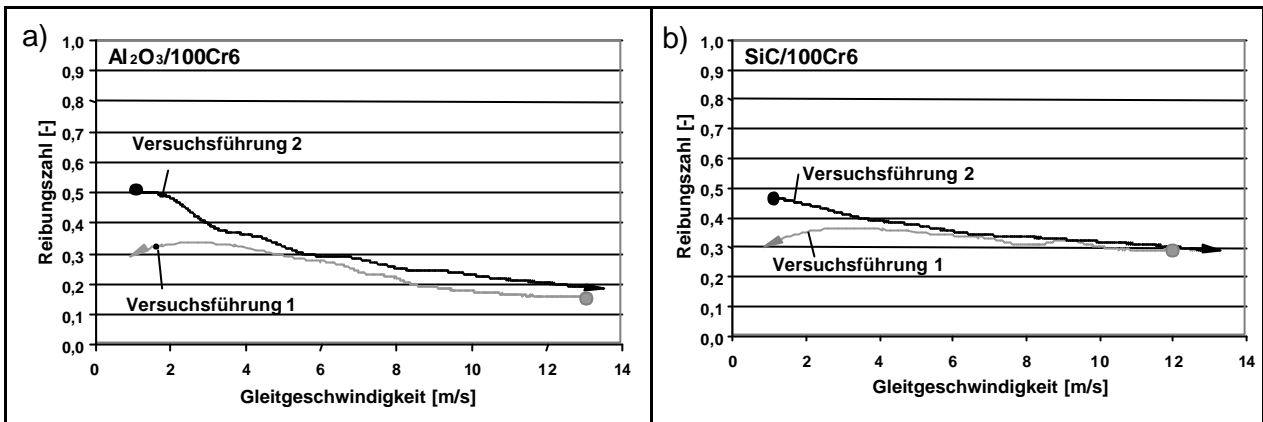


Bild 5 a-b: Exemplarische Darstellung des Einflusses unterschiedlicher Versuchsführungen auf den Reibungszahlverlauf.

In Bild 6 ist die Reibungszahl über der Gleitgeschwindigkeit, bei unterschiedlichen Systemreibpaarungen $\text{Al}_2\text{O}_3 / 100\text{Cr6}$, SiC / 100Cr6, C/SiC / 100Cr6 und organischer Belag / 100Cr6 (1100 U/min; 11,2 J/mm²; 1800 N) mit gleicher Versuchsführung (1) aufgetragen.

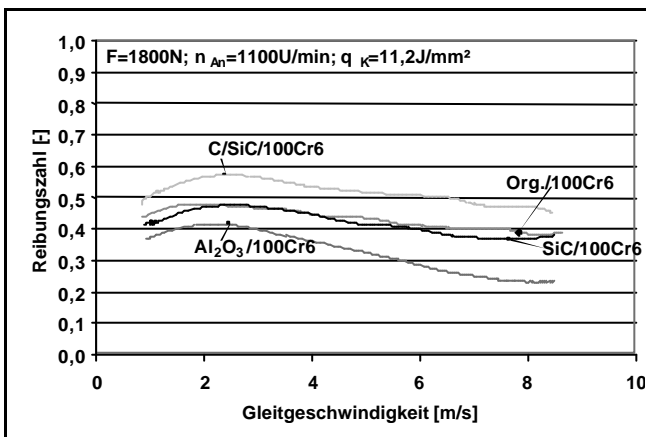


Bild 6: Reibungszahl über der Gleitgeschwindigkeit, bei unterschiedlichen Systemreibpaarungen (1100U/min; 11,2J/mm²; 1800N) (Versuchablauf 1).

Diese Darstellung zeigt, dass mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit die Reibungszahl bei allen Friktionspaarungen fällt. Des Weiteren weist die Systemreibpaarung SiC/100Cr6 einen ähnlichen Betrag und Verlauf der Reibungszahl wie die Systemreibpaarung organischer Belag / 100Cr6 auf. Der Betrag der Reibungszahl der Systemreibpaarung $\text{Al}_2\text{O}_3 / 100\text{Cr6}$ ist von allen vier Paarungen der geringste. Des Weiteren ist der Reibungszahlgradient dieser Paarung ungeeigneter für ein Kupplungssystem.

Die Bilder 7 a-b zeigen den Einfluss der Anpresskraft bei gleicher Antriebsdrehzahl (1100 U/min). Der Einfluss der Anpresskraft (1200N, 1800N und 2400N) ist bei unterschiedlichen Energiestufen ($q_k=11,2\text{J/mm}^2$ bzw. $22,5\text{J/mm}^2$) vernachlässigbar. Dominierend ist aber für den hier untersuchten Bereich der Anpresskräfte die Abhängigkeit der Reibungszahl von der Gleitgeschwindigkeit [9].

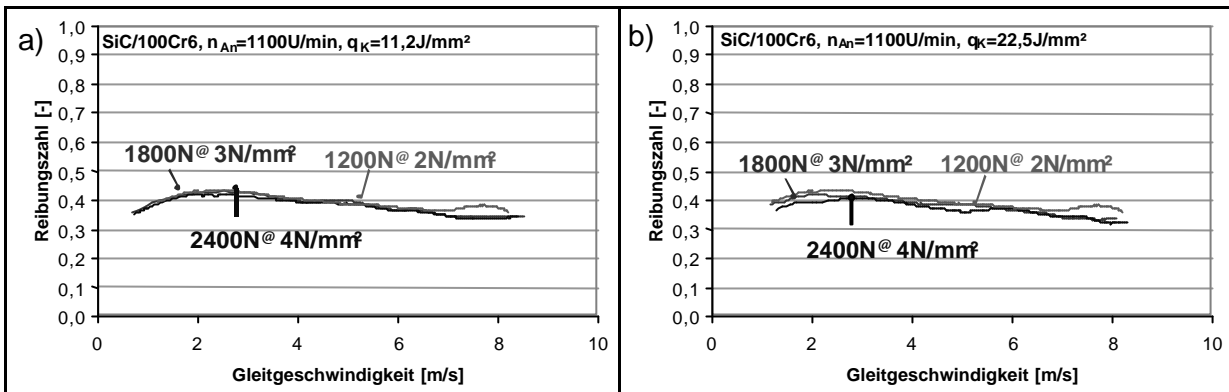


Bild 7 a, b: Reibungszahlverlauf über Gleitgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Anpresskräften (Versuchablauf 1).

Die Bilder 8 a-b zeigen den Einfluss der Oberflächenrauigkeit bei gleicher Anpresskraft (450 N) und gleichen Antriebsdrehzahlen (700 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 Oberflächenqualität bei geringen Gleitgeschwindigkeiten zu erkennen ($\Delta\mu=0,1$). Dieser Einfluss nimmt mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit bzw. bei höheren Energiestufen ab.

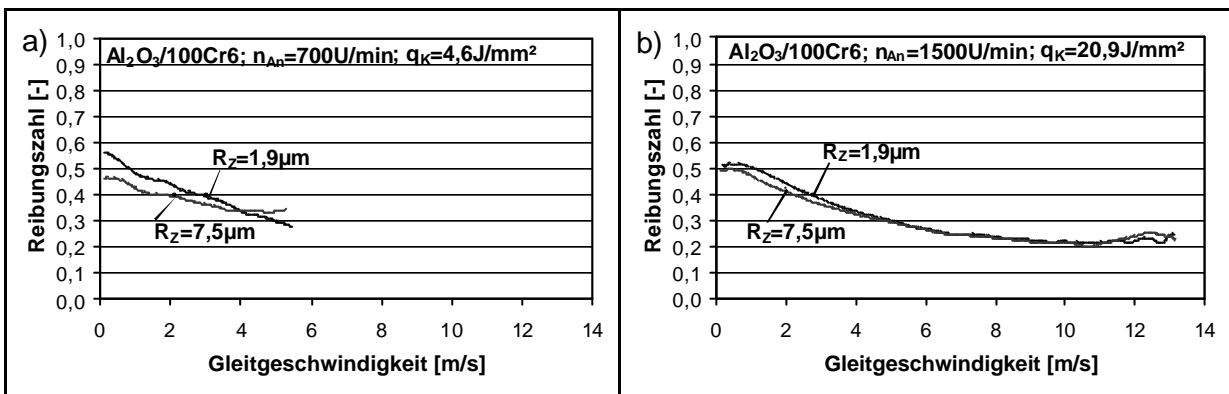


Bild 8 a-c: Reibungszahlverlauf über Gleitgeschwindigkeit bei gleicher Anpresskraft ($F=450$ N) und gleichen Antriebsdrehzahlen (700 bzw. 1500 U/min). (Versuchablauf 1).

In den Bildern 9 a-b wird der Einfluss der Laserrandschichtmodifikation dargestellt. Die Reibungszahl der Systemreibpaarung Al₂TN/100Cr6 ist um ein $\Delta\mu=0,2$ größer als Al₂O₃/100Cr6. Die Reibungszahlgradienten beider Systemreibpaarungen sind annähernd identisch.

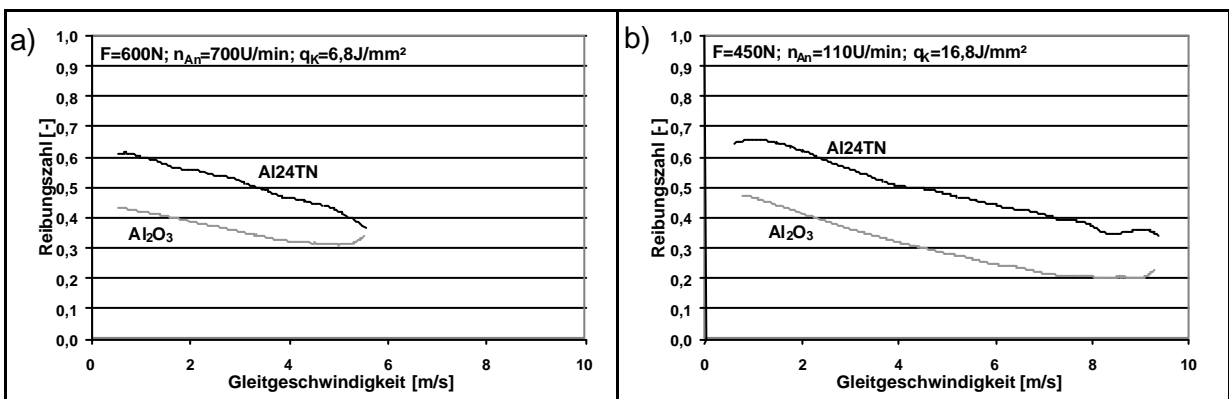


Bild 9 a-b: Reibungszahlverlauf über Gleitgeschwindigkeit (Versuchablauf 1).

In den Bildern 10 a-b ist die Temperaturverteilung auf der Pelletoberfläche der Reibpaarung SiC/100Cr6 und C/SiC/100Cr6 in einer Sequenz dargestellt, bei gleicher 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 beider Paarungen sind im kreisförmigen Messbereich annähernd identisch. Die Systemreibpaarung C/SiC/100Cr6 weist einen um einen Faktor 2 höhere maximale Temperatur auf als SiC/100Cr6.

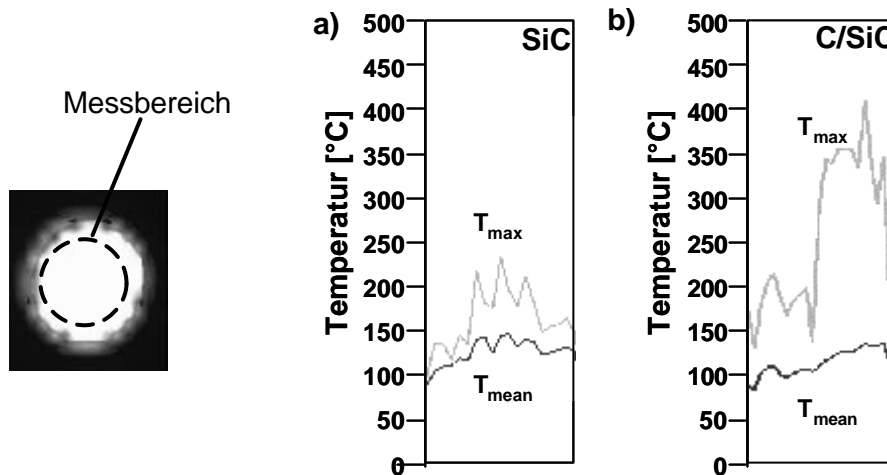


Bild 10 a-b: Exemplarische Thermographieaufnahme der Systemreibpaarungen C/SiC/100Cr6 und der zeitliche maximale und mittlere Temperaturverlauf von SiC/100Cr6 und C/SiC/100Cr6.

4. 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 [2, 3].

5. Diskussion und Ausblick

Im Hinblick auf den Einsatz in Kfz-Kupplungen wurde das Potenzial der Ingenieurkeramik aufgezeigt. Da bei den Systemreibuntersuchungen die Reibungszahl über der Gleitgeschwindigkeit fällt, ist es im weiteren Verlauf der Arbeiten wichtig, auf der Werkstoffseite Lösungen zu finden, die einen neutralen (Wunsch - steigenden) Reibungszahlverlauf über der Gleitgeschwindigkeit zeigen. Hierzu werden im Teilprojekt B2 Laserrandschichtmodifikationen an der Keramik durchgeführt.

Für die Konzipierung neuer Systemlösungen ist es wichtig, tiefere Erkenntnisse über den Wärmehaushalt der Kupplung zu gewinnen. Aus diesem Grund werden in weiteren Arbeiten in Zusammenarbeit mit Teilprojekt C2 detaillierte FEM-Modelle zu einigen 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.

6. Literatur

- [1] H. Czichos, K.-H. Habig: Tribologie-Handbuch – Reibung und Verschleiß, Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, Braunschweig 1992
- [2] A. Albers; A. Arslan: Einsatz von Keramik zur Leistungssteigerung von Kraftfahrzeugkupplungen und die Auswirkung auf die Systemkonstruktion 44. Tribologie Fachtagung; Reibung, Schmierung und Verschleiß; 22.-24.Sept.2003, Göttingen, Bd. II, GfT, Gesellschaft für Tribologie e.V., Moers, 2003, S. 70/1-70/10.
- [3] A. Albers; A. Arslan: Potenzialabschätzung keramischer Teilbeläge für den Einsatz in trockenlaufenden Kupplungssystemen mittels experimenteller Untersuchungen VDI-Berichte Nr. 1786, Kupplungen und Kupplungssysteme, S.265-280, ISBN 3-18-091786-5, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2003
- [4] A. Albers, D. Herbst. Schwingungen in Reibkupplungen - Ursachen, Auswirkungen, Abhilfen VDI-Berichte 1568, Düsseldorf (2000) S. 273-295
- [5] A. Albers, S. Matthiesen: Konstruktionsmethodisches Grundmodell zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion technischer Systeme, Konstruktion, 7/8 2002,(2002), S. 53–59
- [6] M. Fischer: Potenziale und Grenzen der PKW-Trockenkupplung. VDI Berichte Nr. 1610, 2001, S. 203-222.
- [7] J. Gramberger; K.-D. Löcker: Trockenlaufende Sinterreibbeläge. Antriebstechnik 28 (1989) 11, S. 68-75.
- [8] A. Albers; A. Arslan; D. Herbst: Keramik für den Einsatz in Bremsen und Kupplungen. ATZ- Automobiltechnische Zeitschrift 103 (2001) H. 5, 414-419.

2. Statuskolloquium des SFB 483 am 27. Januar 2004 in Karlsruhe

- [9] 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.