

## Trockenkupplung mit keramischen Reibelementen

Aslı Arslan, Albert Albers

Universität Karlsruhe (TH), Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau

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].

Untersucht werden die Systemreibpaarungen  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GG25}$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3/100\text{Cr6}$ . Für beide Paarungen wurde gezeigt, dass eine Abhängigkeit der Reibungszahl von Anpresskraft, bzw. Beschleunigungszeit (**s. Bild 3**) vorhanden ist.

In den Versuchen wurde ermittelt, dass bei den Friktionspaarungen  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GG25}$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3/100\text{Cr6}$  die Reibungszahl eine Funktion der Anpresskraft, Winkelgeschwindigkeit und Gleitgeschwindigkeit ist.

Die Verschleißuntersuchungen an der Systemreibpaarung  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GG25}$  ergaben, dass der Verschleiß mit zunehmender Anpresskraft steigt. Die Verschleißintensität bei der Systemreibpaarung  $\text{Al}_2\text{O}_3/100\text{Cr6}$  ist demgegenüber um einen Faktor 4,5 geringer.

### 1. Einleitung

Ein Kupplungssystem ist ein Friktionssystem, bei dem ein Schlupfvorgang zwischen Wirkflächen ausgenutzt wird, um Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Teilsystemen unter Last auszugleichen. Dabei wird immer ein Teil der Energie in Wärme gewandelt und dissipiert. Kupplungen müssen ein Moment schalten und dosieren können. Als wichtige Nebenbedingung werden im geschalteten Zustand hohe Haltekräfte verlangt. In modernen Pkw-Kupplungssystemen werden heute in den meisten Anwendungsfällen Reibbeläge auf organischer Basis in Paarung mit Grauguss eingesetzt. Die zulässigen Leistungsdichten dieser Materialpaarungen werden dabei durch die niedrigen zulässigen Betriebstemperaturen ( $\leq 250^\circ\text{C}$ ) und Flächenpressungen ( $\leq 0,4 \text{ MPa}$ ) der organischen Reibbeläge begrenzt und in vielen Fällen schon bis zur Grenzbelastung ausgenutzt [2]. Um zukünftig gewichtsreduzierte, kompakte Kupplungssysteme realisieren zu können, müssen daher Systeme entwickelt werden, die höhere Leistungsdichten zulassen. Sintermetall-Beläge erlauben höhere Flächenpressungen ( $\leq 0,7 \text{ MPa}$ ) und Betriebstemperaturen ( $\leq 450^\circ\text{C}$ ) als organische Reibbeläge, bieten jedoch einen sehr schlechten Anfahrkomfort, so dass sich ihr Einsatz auf Landmaschinen und schwere Nutzfahrzeuge beschränkt [3]. Im Automobilrennsport kommen teilweise Kupplungsbeläge aus kohlefaserverstärktem Kohlenstoff (CFC) zum Einsatz. Einem Großserieneinsatz von CFC-Verbundwerkstoffen stehen ihr hoher Preis, ihr hoher Verschleiß

## 1. Statuskolloquium des SFB 483 am 22. Januar 2002 in Karlsruhe

bei geringen Temperaturen und Anpressdrücken, sowie ihre starke Oxidationsanfälligkeit ab etwa 450°C entgegen [4]. Erweiterte gesetzliche Anforderungen bezüglich der in den heutigen Serienanwendungen eingesetzten Friktionswerkstoffen – z.B. Schwermetallinhalt – erzwingen in den nächsten Jahren eine massive Neuentwicklung von Friktionswerkstoffen. Als möglicher Lösungsansatz bietet sich der Einsatz ingenieurkeramischer Werkstoffe wie SiC oder Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> an, die sich durch die Kombination aus hoher Temperaturbeständigkeit, Druckfestigkeit, Steifigkeit und Härte, verbunden mit einer vergleichsweise geringen Dichte auszeichnen. Sie versprechen ein großes Potential für Friktionsanwendungen unter hohen mechanischen, tribologischen und thermischen Beanspruchungen.

Ziel dieses Teilprojekts ist es, dieses Potential von ingenieurkeramischen Werkstoffen in ungeschmierten Friktionssystemen aufzuzeigen und konstruktive Gestaltungshinweise und grundlegende Lösungen für den Einsatz der Ingenieurkeramik zu erarbeiten. Als Demonstrator wurde wegen der hohen Anforderungen an das Friktionssystem die Kraftfahrzeugkupplung gewählt.

## 2. Versuchswerkstoffe und experimentelle Methodik

### 2.1 Referenzwerkstoffe

Die tribologischen Untersuchungen wurden an den Paarungen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GG25 und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/100Cr6 durchgeführt. Der Grauguss GG25 wurde im perlitischen Anlieferungszustand mit einer Härte von 225 ± 5 HV eingesetzt. Der Stahl 100Cr6 wurde im Anlieferungszustand mit einer Härte von 180 ± 5HV eingesetzt. Die Härte der Keramik lag mit 1670 HV (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) deutlich über denen der metallischen Werkstoffe.

### 2.2 Tribologische Systemuntersuchungen

Die tribologischen Untersuchungen unter praxisähnlichen Beanspruchungsbedingungen erfolgen auf einem am Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau neu entwickelten Prüfstand. Der bei den meisten Kupplungen übliche ringförmige Reibbelag ist für Keramik ungeeignet. Verformungen durch Temperaturgradienten und fertigungsbedingte Parallelitätsabweichungen würden zu Biegespannungen im Keramikring bei geschlossener Kupplung führen. Außerdem ist dann der tragende Oberflächenanteil während der Schlupfphase durch die geringe Nachgiebigkeit der Keramik klein. Dies zeigt die Auswirkung der Werkstoffwahl auf die konstruktive Gestalt. Als erster Lösungsansatz wurde daher ein Pellet-Design entwickelt, das in den Untersuchungen verwendet wird. Statt geschlossener Keramikringe werden mehrere Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Pellets (**Bild 1**) eingesetzt, die einzeln angefedert werden. Für die Untersuchungen wurden 3 Pellets mit einer Anpressplatte aus Grauguss GG25 bzw. Stahl 100Cr6 gepaart (**Bild 2**). Der mittlere Reibradius ist 100mm. Die Pellets werden mit der unbearbeiteten "as sintered" Oberfläche ( $R_z \leq 7,3 \mu\text{m}$ ) verwendet, während die Scheiben plangedreht mit einem  $R_z$ -Wert von  $\leq 13,6 \mu\text{m}$  eingesetzt werden.

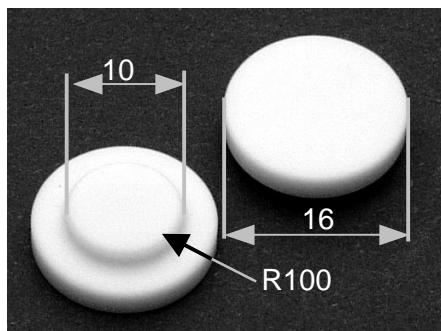
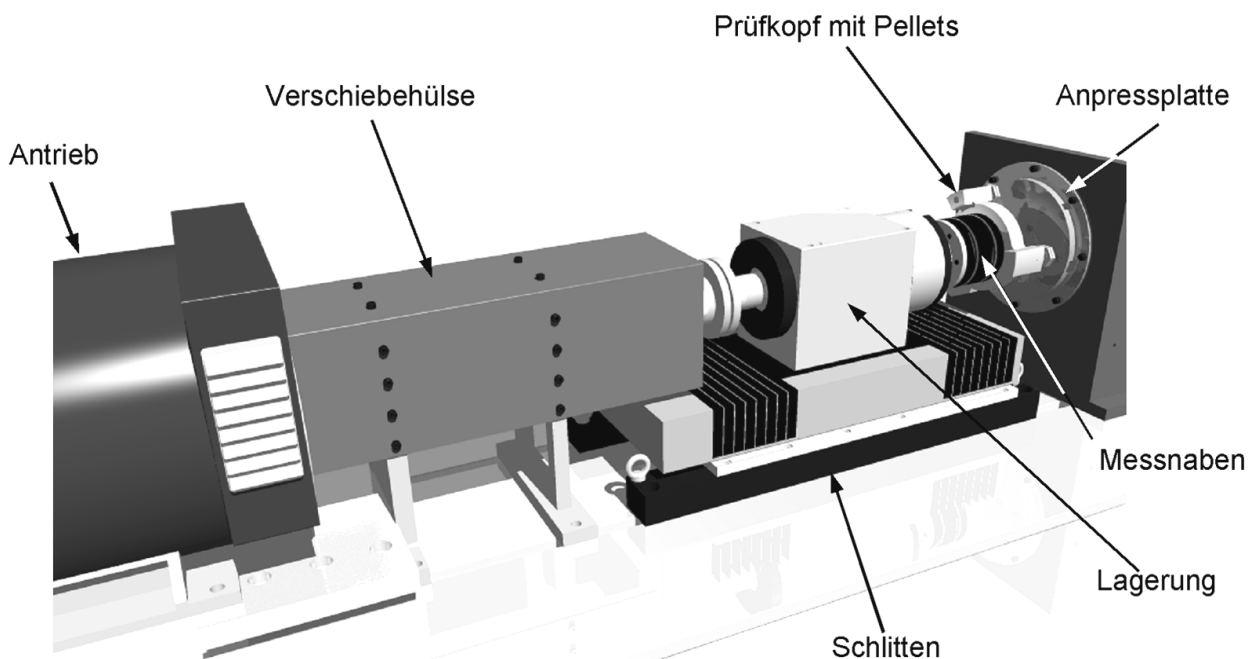


Bild 1: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Pelletgeometrie und Abmessungen



Normalkraft $F_N$ :	150; 200; 250; 300 N	Spurradius $r$ :	100 mm
Winkelbeschleunigung $\dot{\omega}$ :	32; 49; 72 rad/s <sup>2</sup>	Anpressplatten:	GG25 (ø 220 mm)
Enddrehzahl:	500, 1000 U/min		100Cr6 (ø 220 mm)
Temperatur $T$ :	RT (20 - 25°C)	Pellets:	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ø 10 mm)

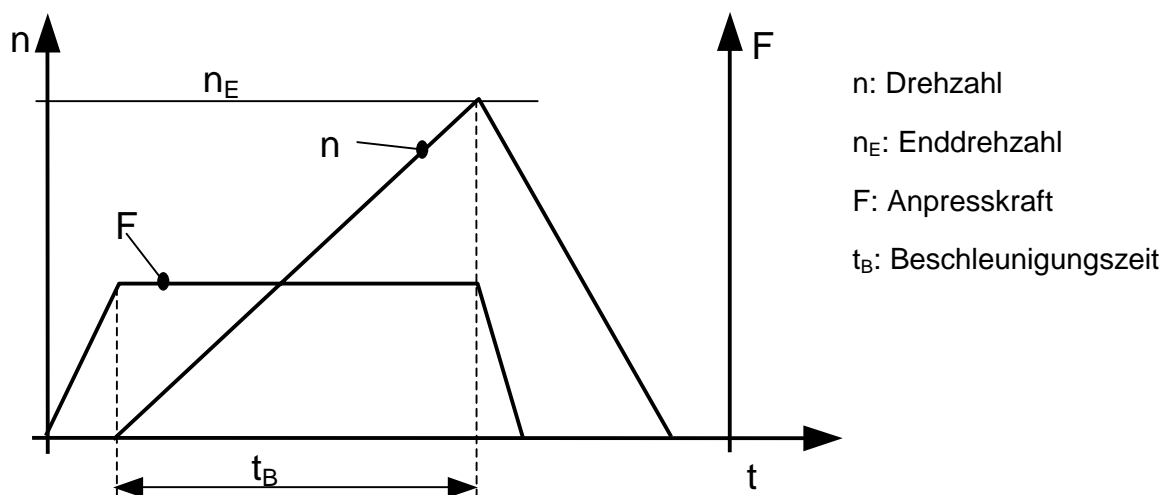
**Bild 2:** Schematische Darstellung des Prüfstandes und Versuchssparameter (s. auch Bild 3) für die Untersuchungen unter praxisähnlichen Beanspruchungsbedingungen im System "Pellet/Scheibe".

Der für die Untersuchungen gewählte Prüfzyklus besteht aus insgesamt 20 Versuchsblöcken. Ein Versuchsblock enthält 24 Versuchspunkte (s. **Tabelle 1**). Jeder dieser Versuchspunkte wird 20 mal wiederholt. Nach dem Schließen des Prüfstandes und dem Aufbringen der Normalkraft (150, 200, 250 bzw. 300 N) wird der Prüfkopf mit den Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Pellets auf Enddrehzahl (500 bzw. 1000 U/min) beschleunigt. Dies erfolgt in unterschiedlichen Zeiten (s. **Tabelle 1, Bild 3**).

Enddrehzahl $n_E$ [U/min]	Anpresskraft pro Pellet $F$ [N]	Beschleunigungszeit $t_B$ [s]		
500	50	2,6	1,3	0,6
1000	50	5,2	2,6	1,3
500	66	2,6	1,3	0,6
1000	66	5,2	2,6	1,3
500	83	2,6	1,3	0,6
1000	83	5,2	2,6	1,3
500	100	2,6	1,3	0,6
1000	100	5,2	2,6	1,3

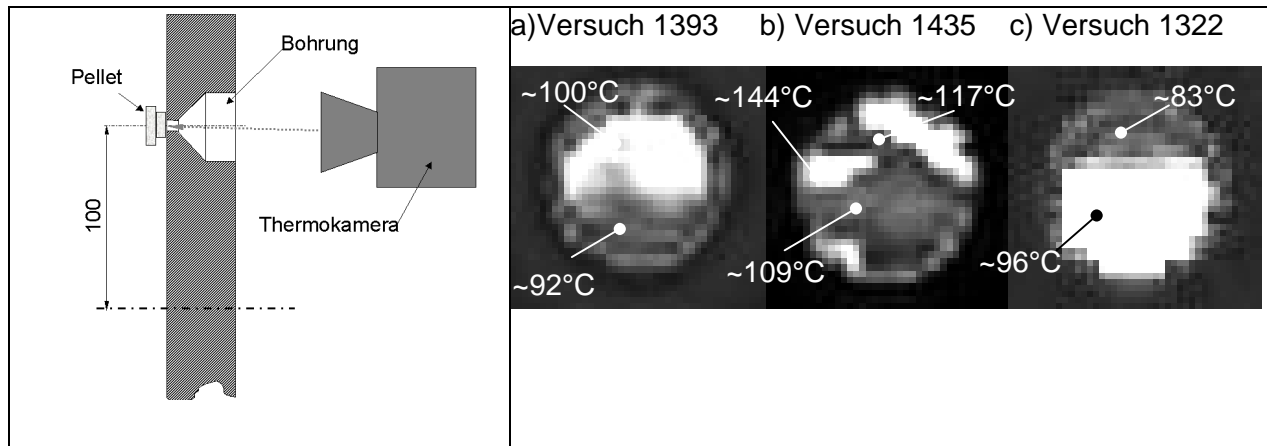
Versuchspunkte  
Versuchsblock

**Tabelle 1:** Prüfzyklus



**Bild 3:** Schematische Darstellung des Versuchsablaufs

Nach dem Erreichen der Enddrehzahl wird der Prüfstand geöffnet ( $F_N = 0$  N) und der Antriebsmotor gestoppt. Nach 20 Versuchen wird das Profil der Plattenoberfläche mittels eines induktiven Wegaufnehmers erfasst. Überschreitet die Laufspurtiefe das konstruktionsbedingte Maximum, wird der Prüfzyklus abgebrochen. Die Untersuchungen werden bei Raumtemperatur in Laboratmosphäre durchgeführt. Während der Versuche werden die Normalkraft, das Reibdrehmoment des Prüfkopfs und die Temperatur der Scheibe kontinuierlich aufgezeichnet. Die Temperatur wird mittels eines Thermoelements erfasst, welches sich 3 mm unterhalb des Friktionskontaktes befindet. Die Temperatur der Pelletoberfläche im Friktionskontakt wird mit Hilfe einer Ultrakurzzeit-Thermokamera erfasst. Bei diesem Gerät handelt es sich um die derzeit schnellste kommerziell erhältliche Vollbild-Thermokamera. Sie erzeugt Vollbilder mit einer Größe von 256x256 Pixel bei Integrations-(Belichtungs-)zeiten bis hinunter zu 2  $\mu$ s. Um einen direkten Einblick auf die Pelletoberfläche zu erhalten, wird in die Scheiben eine Bohrung eingelassen (s. **Bild 4**). Die Bohrung hat an der Kontaktfläche einen Durchmesser von 3 mm.

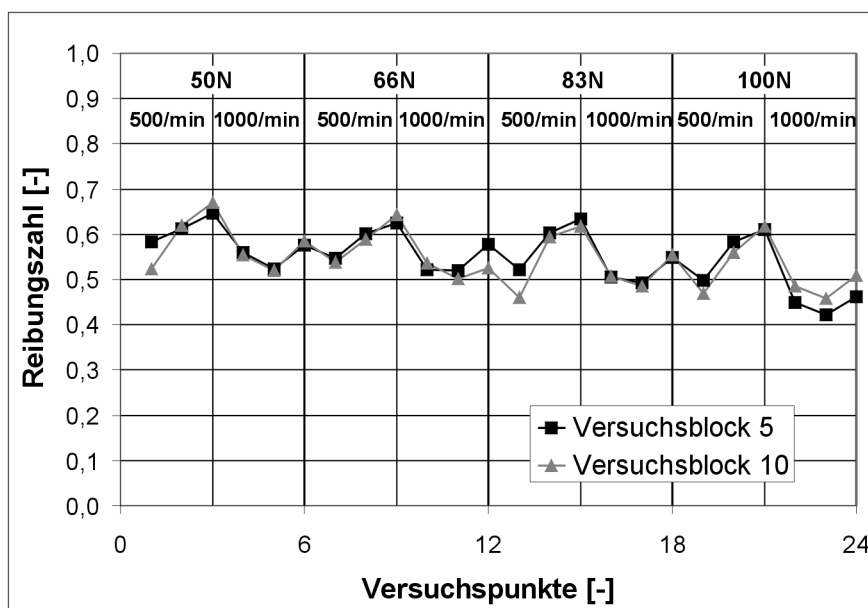


**Bild 4:** Prinzip der Temperaturmessung und Thermographieaufnahme, Systemreibpaarung  $Al_2O_3/GG25$ .

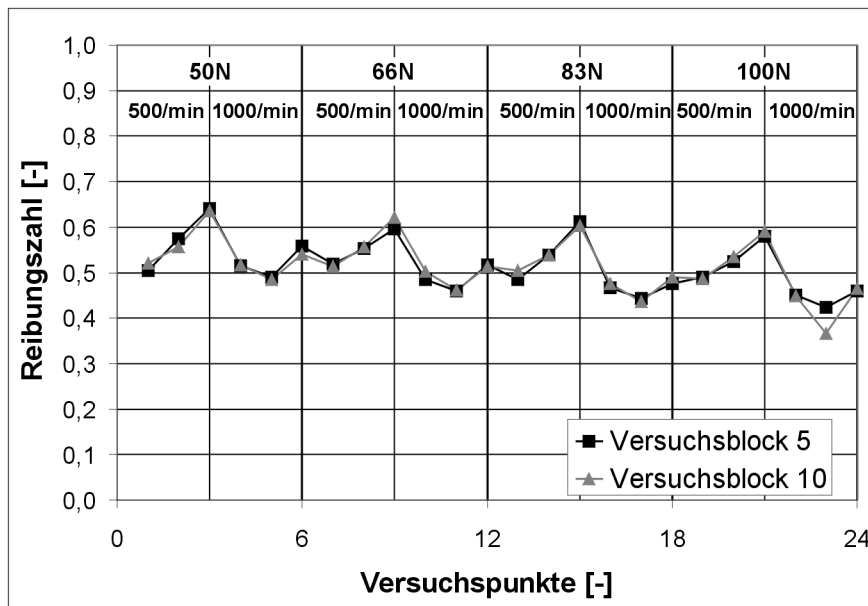
**Bilder 4 a, b, c** zeigen exemplarisch thermographische Aufnahmen bei der Systemreibpaarung  $Al_2O_3/GG25$ . Die Pelletoberfläche zeigt inhomogene Temperaturverteilungen, die sich über die Beschleunigungszeit verändern.

### 3. Ergebnisse

In **Bild 5** werden die mittleren Reibungszahlen der einzelnen Versuchspunkte der Systemreibpaarung  $Al_2O_3/GG25$  (**Bild 5a**) und der Systemreibpaarung  $Al_2O_3/100Cr6$  (**Bild 5b**) an Beispiel von Block fünf und zehn über die einzelnen Versuchspunkte aufgetragen. Diese Darstellung zeigt, dass die mittlere Reibungszahl mit zunehmender Anpresskraft sinkt. Gleichzeitig ist zu sehen, dass eine sehr gute Reproduzierbarkeit zwischen den einzelnen Versuchsblöcken besteht.

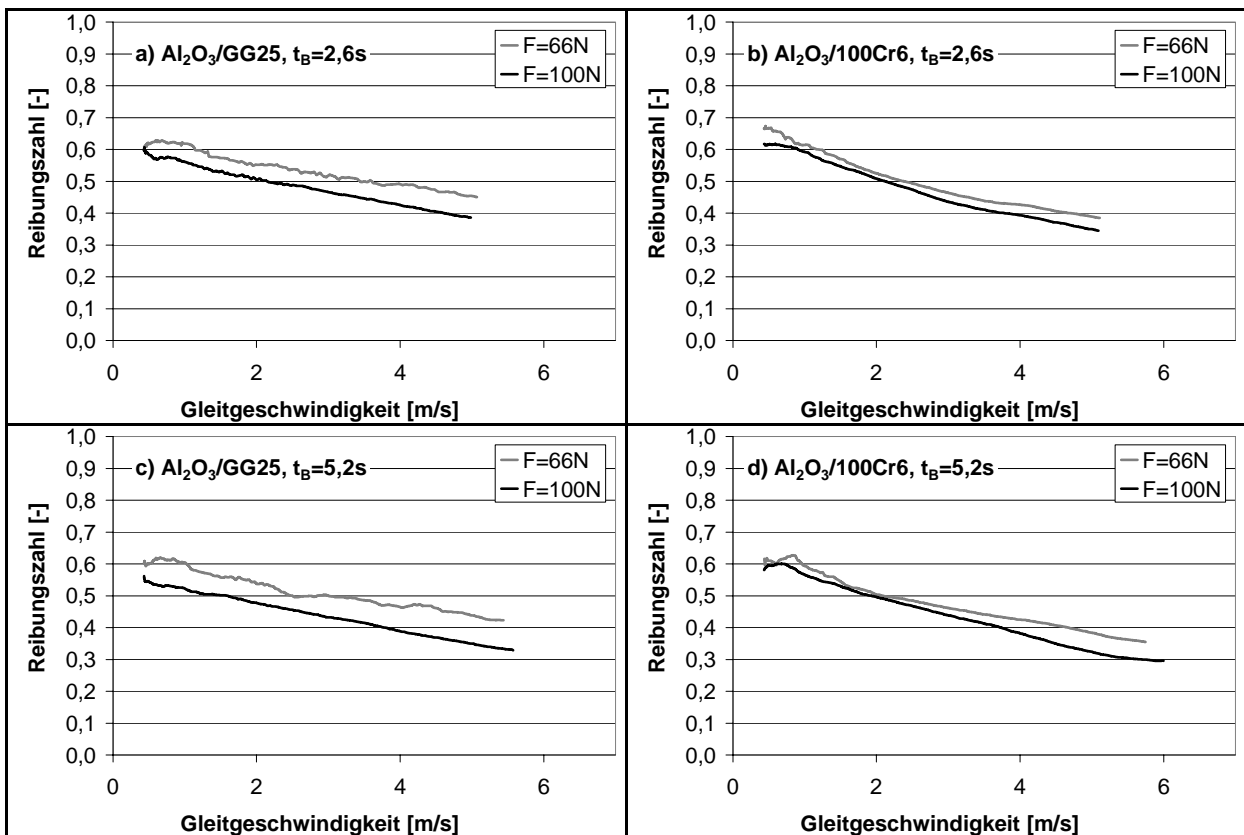


**Bild 5a:** Vergleich der einzelnen Versuchsblöcke fünf und zehn für die Systemreibpaarung  $Al_2O_3/GG25$ . (Zwischen den Blöcken liegen 2400 Versuche).



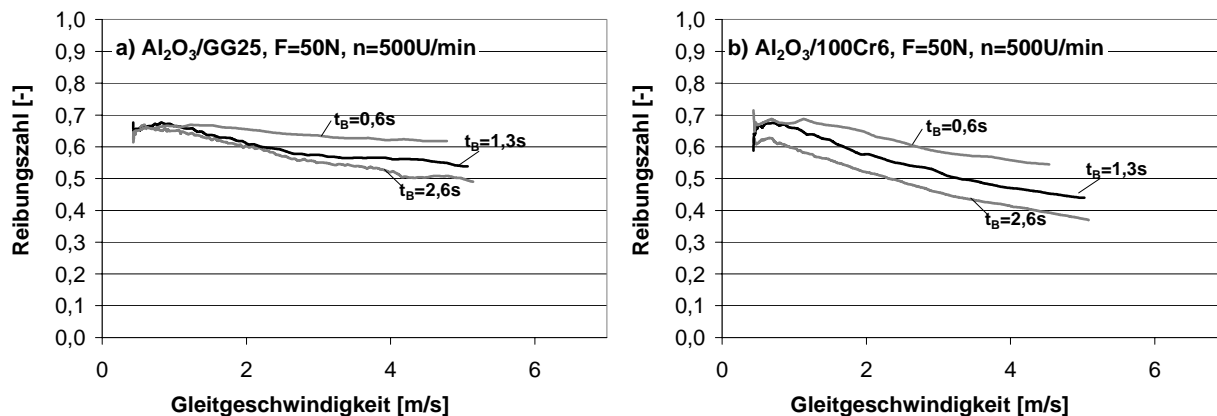
**Bild 5b:** Vergleich der einzelnen Versuchsblöcke fünf und zehn für die Systemreibpaarung  $Al_2O_3/100Cr6$ . (Zwischen den Blöcken liegen 2400 Versuche).

In den Bildern 6 a, b, c, d ist die Reibungszahl über der Gleitgeschwindigkeit, bei unterschiedlichen Enddrehzahlen und Beschleunigungszeiten (2,6s; 500U/min bzw. 5,2s; 1000U/min) aufgetragen.



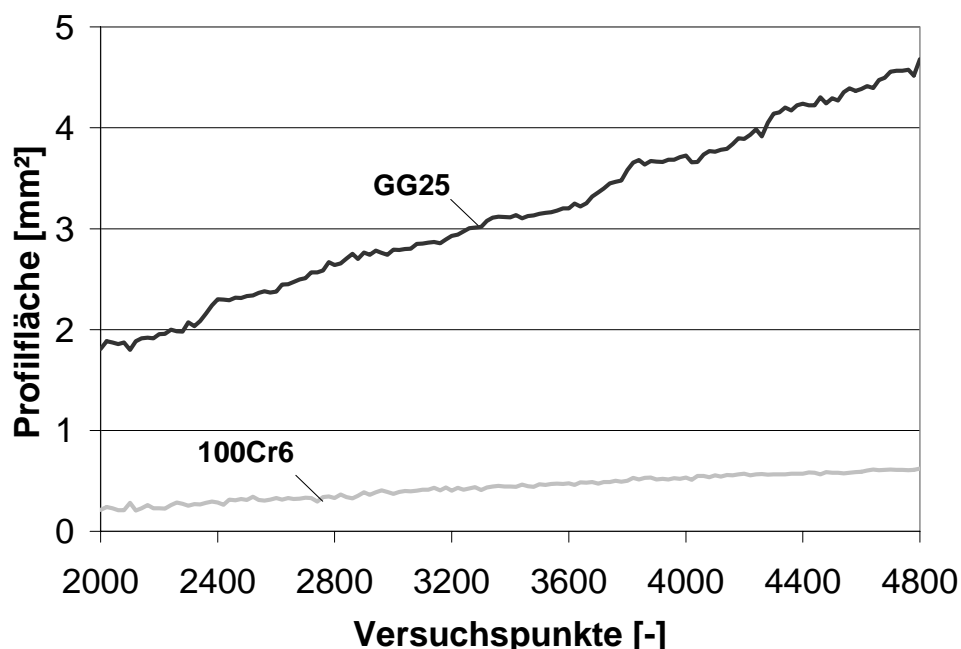
**Bild 6:** Reibungszahlverlauf über Gleitgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Anpresskräften, Enddrehzahl 500U/min, Beschleunigungszeit 2,6s und Enddrehzahl 1000U/min, Beschleunigungszeit 5,2s, Versuchsblock 5.

Der Reibungszahlverlauf über der Gleitgeschwindigkeit ist abhängig von der Beschleunigungszeit. Bei gleicher Anpresskraft und Drehzahl nimmt die Reibungszahl mit kleiner werdenden Beschleunigungszeiten zu (**Bild 7**). Dominierend ist aber die Abhängigkeit der Reibungszahl von der Gleitgeschwindigkeit.



**Bild 7:** Reibungszahlverlauf bei gleicher Anpresskraft, Drehzahl und Versuchsblock 5

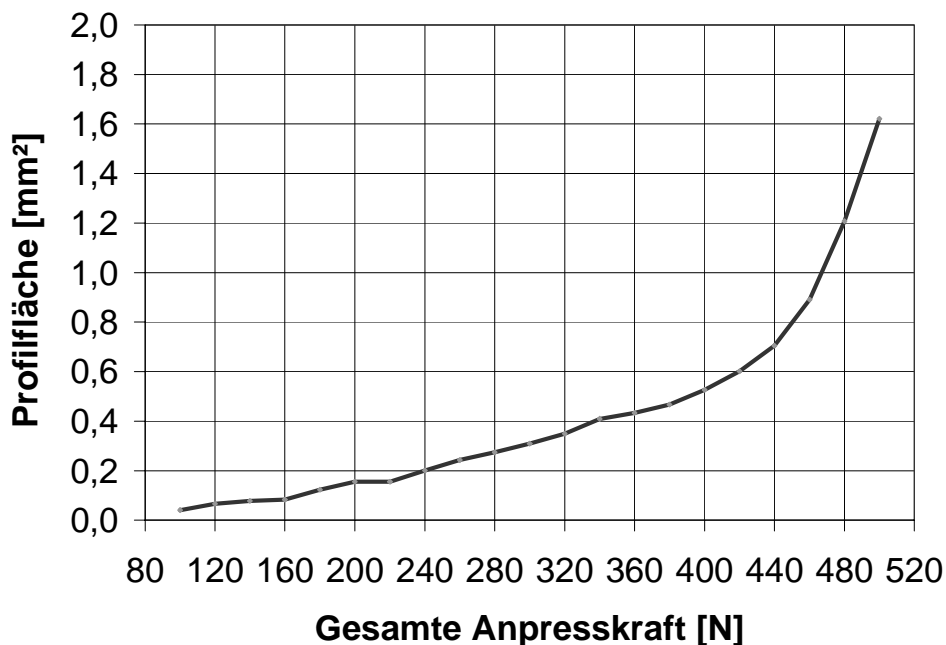
In **Bild 8** ist ein Vergleich des Verschleißverlaufs Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GG25 und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/100Cr6 dargestellt. Die 100Cr6-Platte zeigt einen höheren Verschleißwiderstand gegenüber der GG25-Platte. Durch den sehr geringen Verschleiß der 100Cr6-Platte war eine Auswertung des abgetasteten Profils erst ab dem 2000-ten Versuch sinnvoll. Es zeigt sich, dass der Verschleiß der Graugussplatte bis zu einem Faktor 4,5 höher ist.



**Bild 8:** Vergleich des Verschleißverlaufes über die Versuche von GG25 und 100Cr6

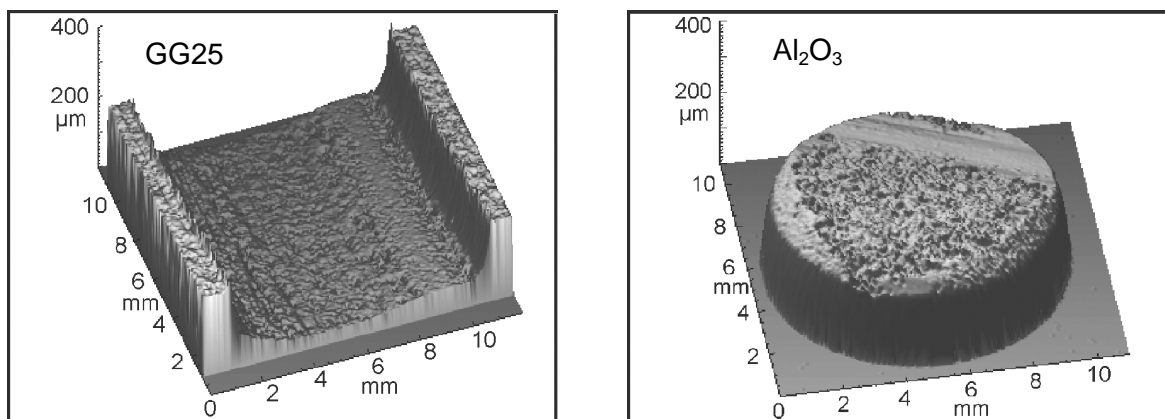
Versuche zur Ermittlung der Abhängigkeit des Verschleißes von der Anpresskraft mit der Systemreibpaarung Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GG25, ergaben, dass der Verschleiß mit zunehmender Anpresskraft

steigt (**s. Bild 9**). Für diesen Versuch wurden alle Versuchspunkte mit der selben Enddrehzahl (1000U/min) und Beschleunigungszeit (2,6s) gefahren. Die gesamte Anpresskraft (Kraft auf 3 Pellets verteilt) wurde in 20N-Schritten von 100N bis 500N gesteigert. Jeder Versuchspunkt wurde 50 mal wiederholt. Vor dem Anfahren des nächsten Versuchspunktes wurde das Profil der Scheibe mittels eines induktiven Wegaufnehmers abgetastet.



**Bild 9:** Verschleißverlauf bei zunehmender Last, Systemreibpaarung  $Al_2O_3/GG25$

Bei Betrachtung der Wirkflächen der gelaufenen Systemreibpaarung  $Al_2O_3/GG25$  (**Bild 10**) ist die Laufspur der Keramikpellets deutlich zu erkennen. Die Graugussplatte hat an den Stellen einen höheren Verschleiß, an denen die ausgebrochenen Körner an der Pelletkontaktoberfläche auftraten.



**Bild 10:** Oberflächenaufnahmen von GG25-Scheibe und  $Al_2O_3$ -Pellet

Die Systemreibpaarung  $Al_2O_3/100Cr6$  zeigte an der Pelletkontaktoberfläche keine ausgebrochenen Körner, sondern abgeschliffene. Die 100Cr6-Platte zeigte einen geringeren



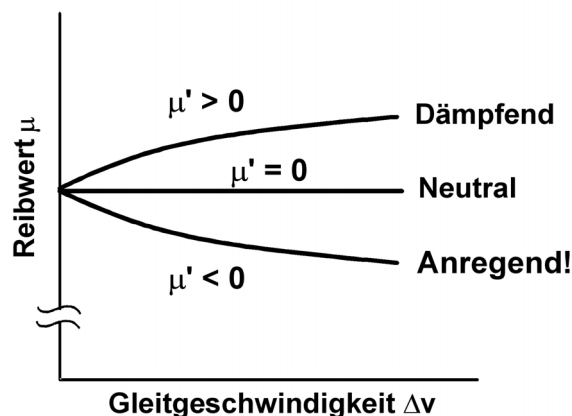
Verschleiß. Allerdings verschleiß hier auch die Keramik. Nach 9600 Versuchen zeigte die Keramik einen Verschleiß von  $\sim 3\mu\text{m}$ .

#### 4. Ausblick

Das Potential der Systemreibpaarungen  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GG25}$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3/100\text{Cr6}$  wurde durch die ersten Untersuchungen aufgezeigt. Die Reibungszahl ( $\mu=0,5-0,7$ ) liegt bis zu einem Faktor 2 über dem der organischen Belag/GG25-Reibpaarung ( $\mu=0,25-0,30$ ).

Der Verschleiß der Grauguss-scheibe in derzeitiger Ausführung liegt nicht in einer akzeptablen Größenordnung. Deshalb sollten hier, nach den ersten Erfahrungen mit 100Cr6, weitere Reibpartner gefunden werden, die im Hinblick auf Verschleiß besser für das Friktionssystem Kupplung geeignet sind.

Da bei beiden Systemreibuntersuchungen die Reibungszahl über der Gleitgeschwindigkeit fällt, ist es im weiteren Verlauf der Arbeiten im des Sonderforschungsbereich 483 wichtig, auf der Werkstoffseite Lösungen zu finden, die einen steigenden Reibungszahlverlauf über der Gleitgeschwindigkeit zeigen. Eine mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit bzw. Drehzahldifferenz leicht steigende Reibungszahl erzeugt Dämpfung und ist für die Systemgestaltung anstrebenswert (**Bild 11**) [6 –7].



**Bild 11:** Reibungszahlverläufe in Abhängigkeit der Gleitgeschwindigkeit

Der Prüfstand wird bis Anfang 2002 erweitert, um dynamische Analysen von Kupplungssystemen durchzuführen und die konstruktiven Lösungen zu validieren.

#### 5. Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung der Forschungsarbeiten im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 483 "Hochbeanspruchte Gleit- und Friktionssysteme auf Basis ingenieurkeramischer Werkstoffe".

#### Literatur

- [1] H. Czichos, K.-H. Habig: Tribologie-Handbuch – Reibung und Verschleiß, Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, Braunschweig 1992

## 1. Statuskolloquium des SFB 483 am 22. Januar 2002 in Karlsruhe

- [2] M. Bergheim: Organisch gebundene Kupplungsbeläge, Möglichkeiten und Grenzen. VDI-Berichte 1323, Düsseldorf (1997) S. 527-548.
- [3] J. Gramberger, K.-D. Löcker: Trockenlaufende Sinterreibbeläge. Antriebstechnik 28 (1989) 11, S. 68-75.
- [4] C. Blanco, J. Bermejo, H. Marsh, R. Menendez: Chemical and physical properties of carbon as related to brake performance. Wear, 213 (1997) 1-12.
- [5] A. Oedekoven: Temperaturverhalten von trockenlaufenden Reibungskupplungen. TH Darmstadt, Dissertation, 1989.
- [6] A. Albers, D. Herbst: Schwingungen in Reibkupplungen - Ursachen, Auswirkungen, Abhilfen. VDI-Berichte 1568, Düsseldorf 2000 S. 273-295
- [7] A. Albers, D. Herbst: Kupplungsrupfen - Ursachen, Modellbildung und Gegenmaßnahmen. VDI Berichte 1416, Düsseldorf 1998 S. 327-359.