

---

# Galvanotechnik oder die Dünnschichttechnologie, wer liefert das bessere Tribodesign für die Biomasse-Wärme-Kraft-Kopplung

---

*Dr. Cord Henrik Surberg, DI Alexander Diem, Dornbirn, Österreich*

*Dr. Ewald Badisch, Wiener Neustadt, Österreich*

## 1. Einleitung

Trockengeschmierte Bauteile auf Kunststoffbasis werden zunehmend in tribologisch beanspruchten Systemen eingesetzt. Gründe dafür sind z.B. die Schwingungs- und Geräuschkämpfung sowie gute Trockenlaufereigenschaften insbesondere unter speziellen Umgebungsbedingungen. Polytetrafluorethylen (PTFE) ist ein Kunststoff, welcher aufgrund seiner guten Trockenschmiereigenschaften sowohl als Füllstoff in anderen Tribo-Kunststoffen wie auch als Matrixwerkstoff eingesetzt wird. Aufgrund der geringen mechanischen Belastbarkeit von PTFE werden härtere Füllstoffe wie beispielsweise ZnO [1], Bronze [2], Aluminiumoxid [3], [4], Metallpulver [5], Stahl-, Aramid, Karbon-(CF) und Glasfasern (GF) [6], [7], [8] beigemischt.

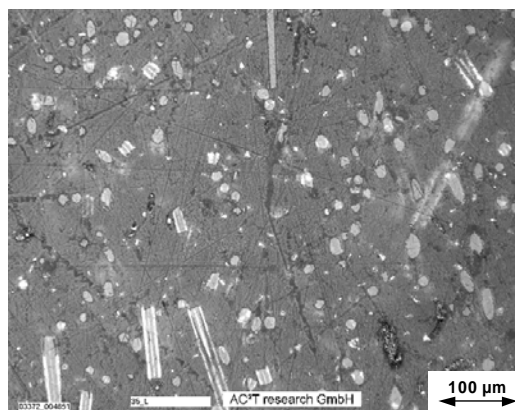
Das Verhalten von PTFE-Compounds im tribologischen Gleitkontakt wurde in den letzten Jahrzehnten eingehend untersucht [9], [10], [11]. Vor allem die Bildung des PTFE-Transferfilms auf verschiedenen Gegenpartnern, wie beispielsweise Stahl [12], [13], [14], Keramik und Hartstoffschichten [15], stand im Fokus der Untersuchungen. Dabei wurde auch der Einfluss verschiedener Füllstoffe auf die Transferfilmbildung analysiert [16]. Der Einfluss von Härte und Rauheit des Gegenpartners auf die Transferbildung und in weiterer Folge auf das Reibungs- und Verschleißverhalten wurde in [17], [18] untersucht.

Konkrete Designempfehlungen für die Auslegung von PTFE-Compound basierten Tribosystemen sind aber in der Regel schwierig aus der Literatur abzuleiten. Insbesondere die tribologischen Eigenschaften von PTFE im Kontakt mit verschiedenen Schichtsystemen ist noch nicht grundlegend untersucht worden. Bei der Verwendung von PTFE-Compounds in industriellen Anwendungen, wie beispielsweise als Dichtringe in Kolben-Zylindersystemen eines Motors zur Wärme-Kraft-Kopplung, besitzen die Auswahl der geeigneten Füllstoffe sowie der Werkstoff und die Oberflächenbeschaffenheit des Gegenpartners eine zentrale Bedeutung für die Funktion des Gleitkontaktes unter den jeweiligen Umgebungsbedingungen. Vor diesem Hintergrund liefert diese Arbeit einen Beitrag zum Verständnis über die Funktionalität von Glasfaserverstärkten PTFE-Verbundwerkstoffen auf deren Reibungs- und Verschleißverhalten mit unterschiedlichen Gegenpartnmaterialien und Oberflächentopographien unter Schutzgasatmosphäre.

## 2. Experimentielle Details

### 3.1 Untersuchte PTFE-Verbunde (Gegenkörper)

Als Polymerwerkstoffmatrix wurde PTFE eingesetzt, welches sehr häufig in der Praxis Anwendung als Festschmierstoff findet. Dieser PTFE-Matrix wurden Glasfasern (GF) beigemischt, welche den Kunststoff rein mechanisch verstärken. In Bild 1 ist der verwendete Polymer-GF-Verbundwerkstoff dargestellt, wobei die GF keine bevorzugte Orientierung in der PTFE-Matrix besitzen. Die GF besitzen eine scharfkantige zylindrische Morphologie mit einem Durchmesser von 10 – 20 µm und einer Länge von 50 – 200 µm.



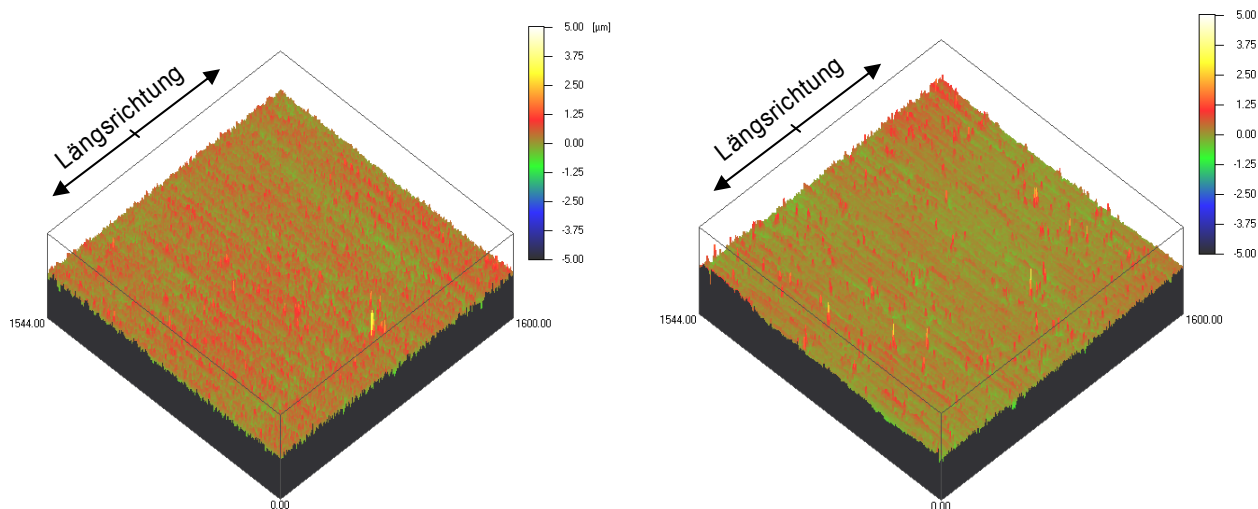
**Bild 1:**  
**Lichtmikroskopische**  
**Aufnahme des**  
**PTFE+GF-**  
**Verbundwerkstoffes**

### 3.2 Untersuchte Oberflächen (Grundkörper)

Vier unterschiedliche Oberflächen wurden auf deren tribologische Wechselwirkung im Gleitkontakt mit PTFE+GF untersucht. Diese werden wie folgt eingeteilt:

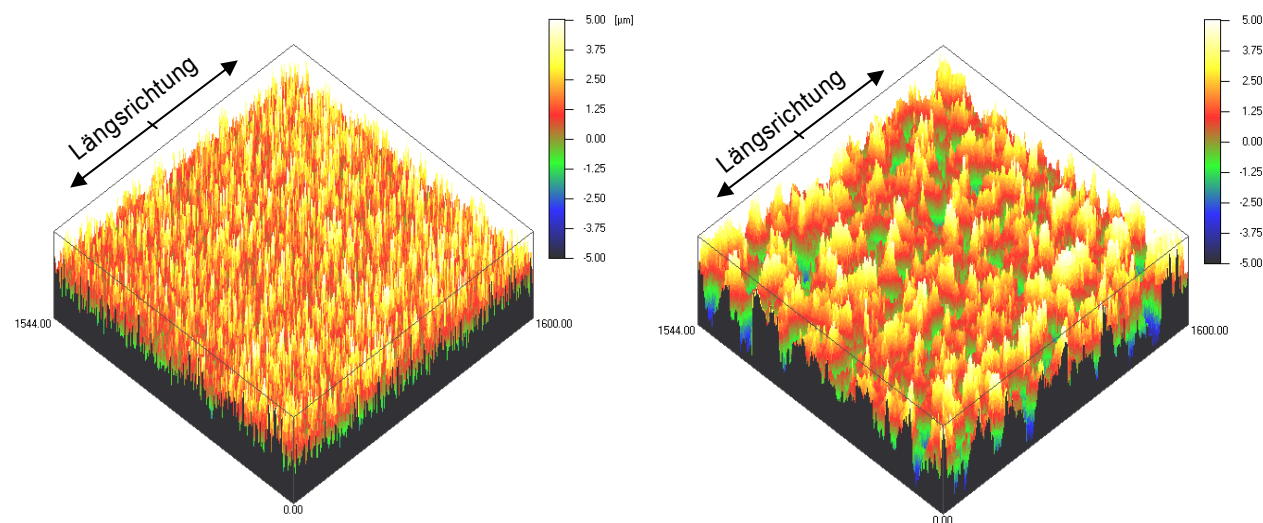
- Variante 1: DLC-Beschichtung
- Variante 2: WC-Hartstoffschicht
- Variante 3: Hartchromschicht
- Variante 4: gestrahlte (Stahl)Oberfläche

Die Bestimmung der Oberflächentopographie erfolgte mittels konfokalem Weißlichtmikroskop (Fa. Nanofocus [19]). Diese Oberflächen sind in 3D-Darstellung (Spitze-Spitze-Wert,  $\pm 5 \mu\text{m}$ ) in Bild 2 bis Bild 5 dargestellt. Eine Zusammenfassung der Oberflächencharakteristik an ausgewählten Rauheitsparametern in Längsrichtung zeigt Bild 6. Variante 1 besitzt eine sehr glatte Oberfläche, wobei eine bevorzugte Orientierung der Rauheiten in Umfangsrichtung festzustellen ist (siehe Bild 2). Eine ähnliche Oberflächencharakteristik kann auch bei Variante 2 beobachtet werden. Die geringe Orientierung der Rauheiten in Umfangsrichtung (siehe Bild 3) liegen in der Oberflächenbehandlung des unbeschichteten Substratwerkstoffes begründet. Deutlich größere Rauheiten können mittels konfokalem Weißlichtmikroskop bei Variante 3 beobachtet werden. Diese besitzt keine bevorzugten Orientierungen (siehe Bild 4). Die höchsten Rauheitswerte aller untersuchten Oberflächen liegen bei Variante 4 vor. Die Oberfläche, welche durch Strahlen mittels Stahlkugeln ( $\varnothing = 0,6 \text{ mm}$ , Härte = 60 HRC, Arondierungsgrad = G3) entstanden ist, zeigt keine bevorzugte Orientierung (siehe Bild 5).



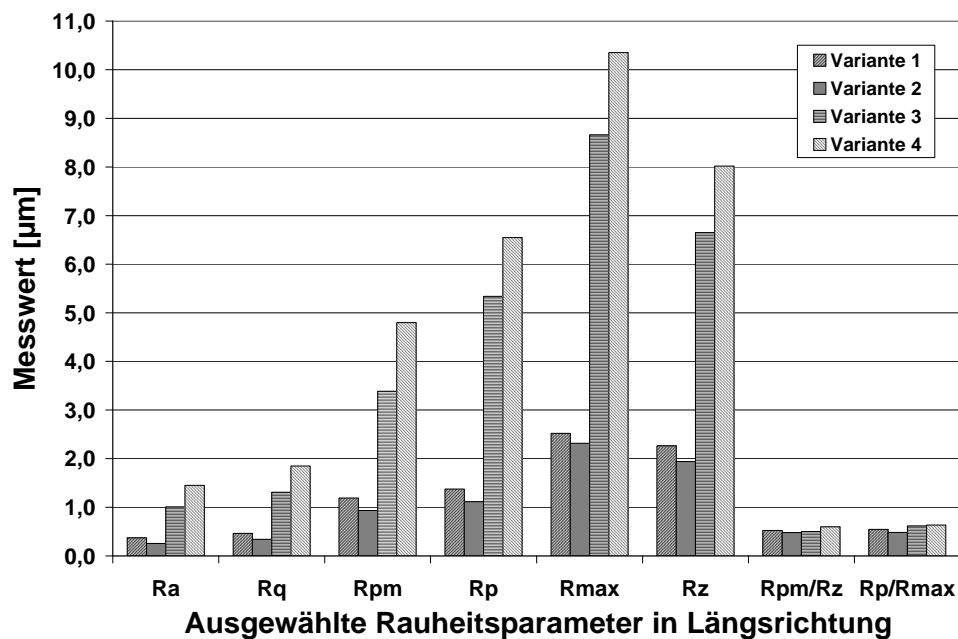
**Bild 2: 3D-Oberflächenaufnahme Variante 1**

**Bild 3: 3D-Oberflächenaufnahme Variante 2**



**Bild 4: 3D-Oberflächenaufnahme Variante 3**

**Bild 5: 3D-Oberflächenaufnahme Variante 4**



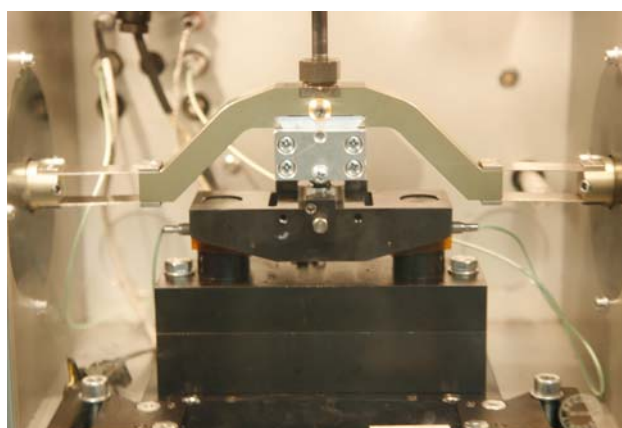
**Bild 6:**  
Ausgewählte  
Rauheitsparameter  
der untersuchten  
Oberflächen in  
Längsrichtung

### 3.3 Mechanisch/dynamische Untersuchungen

Mechanisch/dynamische Untersuchungen wurden mit einem Schwing-Reib-Verschleißtribometer, dem SRV<sup>®</sup>4 (Fa. Optimol Instruments [20]) durchgeführt. Aufbau und Prüfkammer dieses Tribometers sind in Bild 7 und Bild 8 dargestellt.



**Bild 7:** SRV4 Tribometer



**Bild 8:** Detailansicht der Prüfkammer

Die unterschiedlichen Oberflächen (Variante 1 – 4) wurden unter oszillierenden Bedingungen gegen den PTFE-GF-Verbund geprüft. Die Details der Prüfbedingungen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Prüfparameter	
Normalkraft $F_N$ [N]	50
Art der Bewegung	linear oszillierend
Oszillationsfrequenz $\omega$ [ $s^{-1}$ ]	25
Amplitude (Spitze-Spitze) $2a$ [mm]	3
Prüftemperatur $T_{\text{prüf}}$ [ $^{\circ}C$ ]	60
Atmosphäre	Schutzgas
Versuchsdauer $t$ [min]	120

Tabelle 1: SRV Versuchsparameter

Die mechanisch/dynamischen Untersuchungen wurden bei erhöhter Temperatur unter Schutzgasatmosphäre durchgeführt. Die kumulierte Verschleißhöhe wurde während der Versuchsdurchführung mittels kapazitiver Wegmessung bestimmt und wird zur Verschleißquantifizierung herangezogen. Qualitative Bewertung von Verschleißmechanismen und PTFE-Wirksamkeit erfolgte mittels Rasterelektronenmikroskop (REM) und konfokalem Weißlichtmikroskop.

### 3. Diskussion der Untersuchungsergebnisse

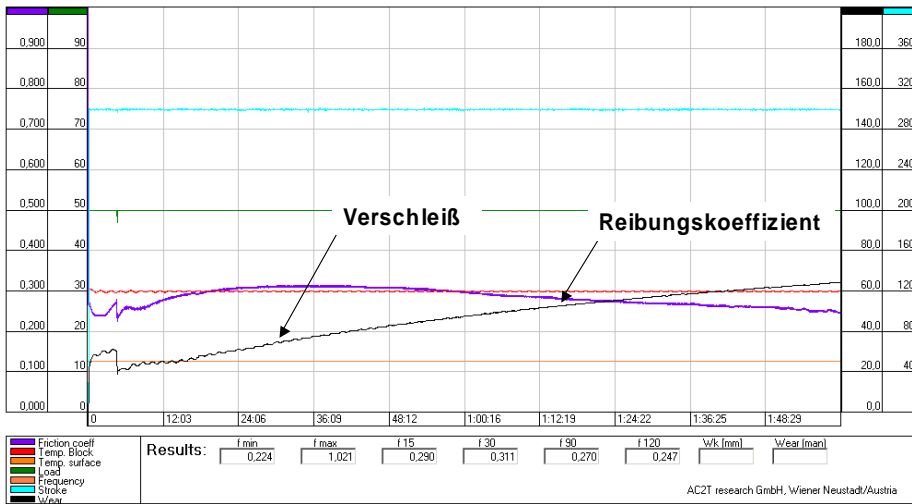
#### 3.1 Reibungscharakteristik

Eine Zusammenstellung der gemittelten Reibungskoeffizienten der untersuchten Werkstoffpaarungen im SRV-Test ist in Tabelle 2 zu sehen. Variante 1 zeigt im tribologischen Kontakt mit PTFE+GF eine Reibungscharakteristik, welche nach einem Einlaufverhalten einen maximalen Reibungskoeffizienten von ca. 0,3 erreicht und sich leicht abfallend einem stationären Wert nähert (siehe Bild 9). Auf der Kontaktoberfläche kann nach dem Versuch ein partieller PTFE-Übertrag festgestellt werden, welcher sich nicht flächendeckend im gesamten Kontakt ausgebildet hat (siehe Bild 11).

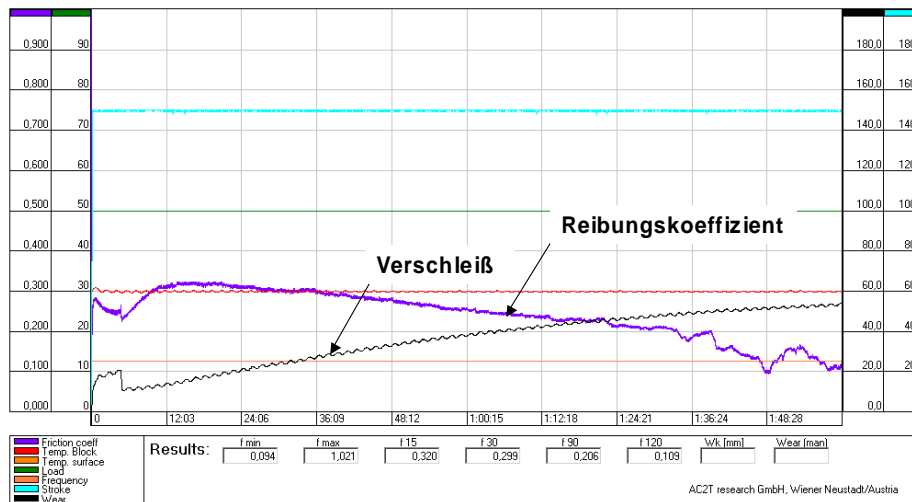
Grundkörper Oberfläche	Gegenkörper	Gemittelter Reibungskoeffizient
1	PTFE+GF	0,27
2	PTFE+GF	0,23
3	PTFE+GF	0,19
4	PTFE+GF	0,20

Tabelle 2: Gemittelte Reibungskoeffizienten im SRV-Test in Abhängigkeit der Werkstoffpaarungen

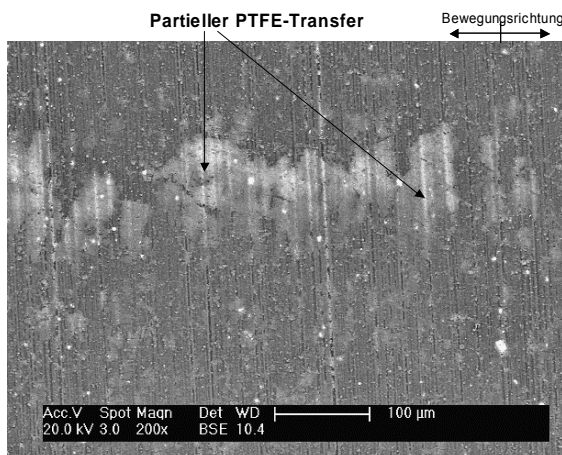
Der über die gesamte Versuchsdauer gemittelte Reibungskoeffizient von Variante 2 gegen PTFE+GF liegt in vergleichbarer Größenordnung (siehe Tabelle 2), jedoch zeigt die Messwertcharakteristik starke Streuungen (siehe Bild 10), welche darauf hinweisen, dass sich kein stabiler und durchgängiger PTFE-Übertrag auf der Oberfläche ausgebildet hat. Mittels REM-Untersuchungen an der Kontaktfläche konnte nachgewiesen werden, dass kein signifikanter PTFE-Übertrag, welcher für eine gleichmäßige Reibungscharakteristik notwendig ist, stattgefunden hat (siehe Bild 12).



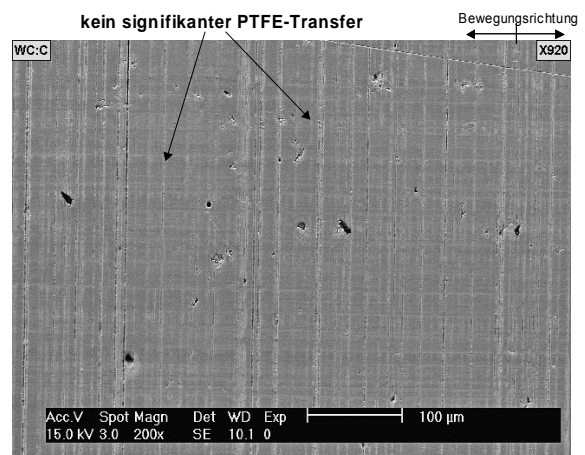
**Bild 9:**  
SRV-Versuchsplot  
Variante1 gegen  
PTFE+GF gelaufen



**Bild 10:**  
SRV-Versuchsplot  
Variante2 gegen  
PTFE+GF gelaufen

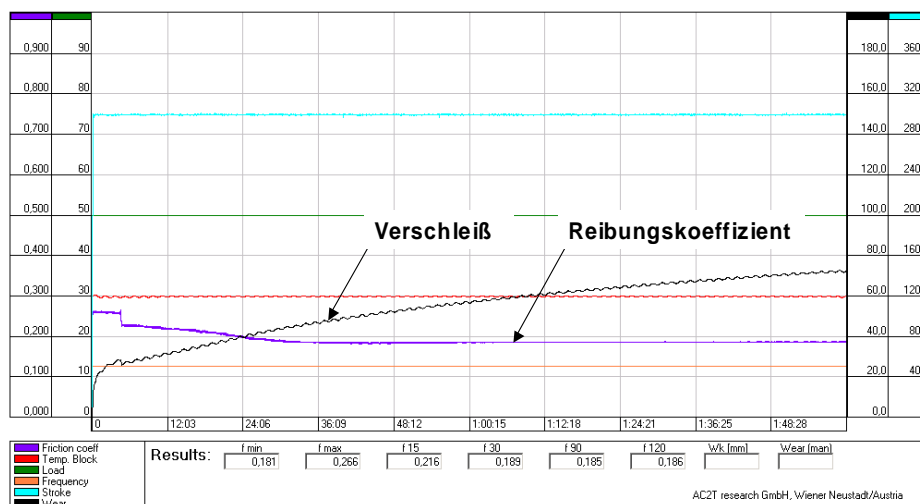


**Bild 11:** REM-Verschleißbild – Variante 1  
gegen PTFE+GF gelaufen

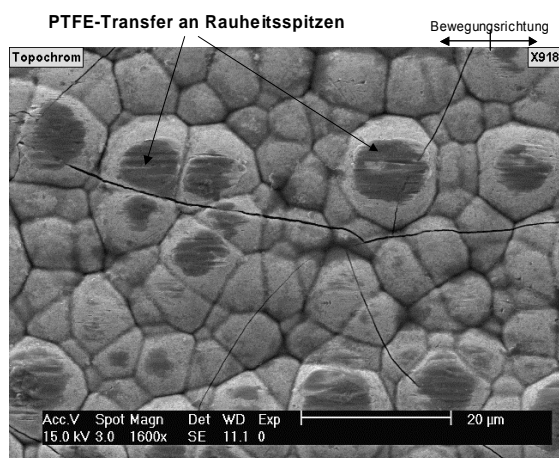


**Bild 12:** REM-Verschleißbild – Variante 2  
gegen PTFE+GF gelaufen

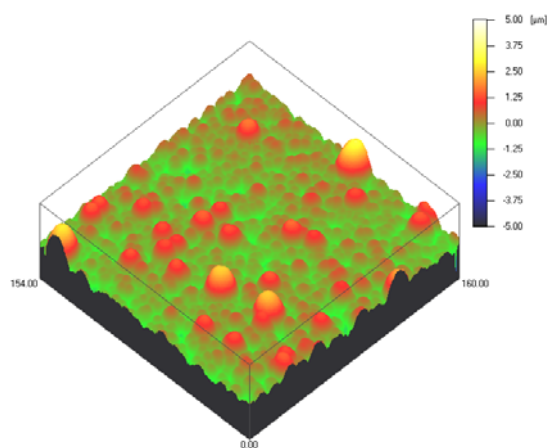
Sehr gleichmäßiges Reibungsverhalten kann bei Variante 3 gegen PTFE+GF festgestellt werden. Der Reibungskoeffizient erreicht nach einer kurzen Einlaufphase einen stationären Wert von ca. 0,2, welcher über die gesamte Versuchsdauer von 2 h konstant bleibt (siehe Bild 13). Die Ursache dieses sehr stabilen Reibungsverhaltens liegt im PTFE-Übertrag auf den Rauheitsspitzen der Oberflächenstruktur, wie es aus Bild 14 ersichtlich ist. Mittels konfokaler Weißlichtmikroskopie lässt sich ein dreidimensionales Bild dieser Oberflächenstruktur darstellen, bei der die Rauheitsspitzen einige  $\mu\text{m}$  aus der Oberfläche herausstehen (Bild 15). Der tribologische Gleitkontakt findet somit ausschließlich an einigen wenigen PTFE-behafteten Rauheitsspitzen statt und ist nicht auf die gesamte Oberfläche gleichmäßig verteilt.



**Bild 13:**  
SRV-Versuchsplot  
Variante 3 gegen  
PTFE+GF gelaufen



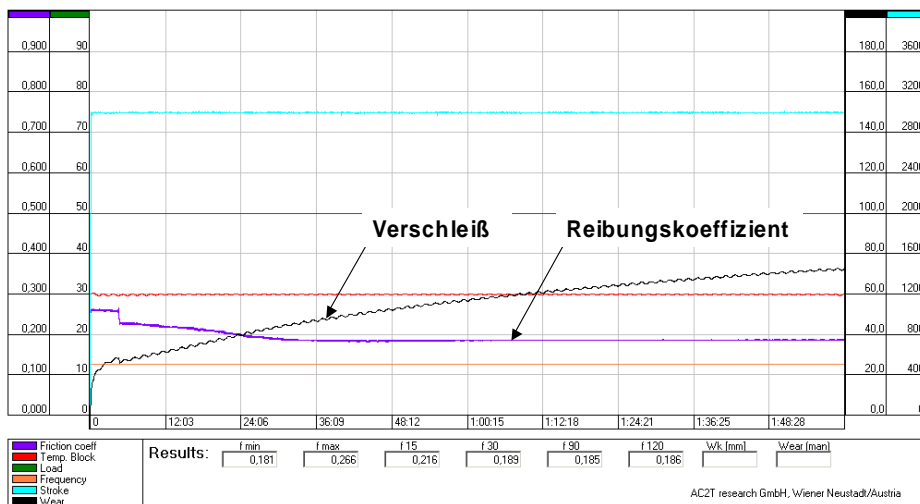
**Bild 14:** REM-Verschleißbild – Variante 3  
gegen PTFE+GF gelaufen



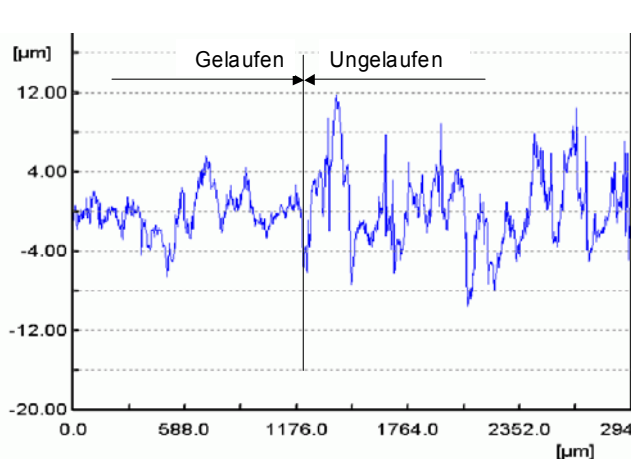
**Bild 15:** 3D-Detailaufnahme von Variante 3 im  
Ausgangszustand

Das Reibungsverhalten von Variante 4 gegen PTFE+GF ist jenem aus Bild 13 sehr ähnlich (siehe Bild 16). Nachdem in der Einlaufphase des Tribosystems die obersten Rauheitsspitzen der Substratoberfläche abgetragen wurden (siehe Bild 17), wird ein sehr gleichmäßiger Reibungskoeffizient dadurch erzielt, dass ein PTFE-Übertrag in die Rauheitssenken stattfindet (Bild 18).

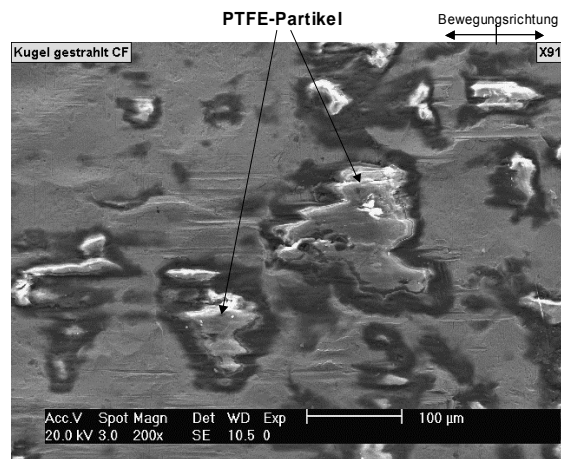
Die tribologischen Untersuchungen haben gezeigt, dass sich bei der gegenständlichen Kontaktsituation die „glattere“ Oberfläche ungünstig auf die Ausbildung eines funktionierenden PTFE-Übertrages auswirkt, eine „rauhe“ Oberfläche dagegen eine gleichmäßige Reibungscharakteristik aufgrund guter PTFE-Wirksamkeit besitzt. Des weiteren kann festgestellt werden, dass die für die tribologische Wechselwirkungen aussagekräftigen Rauheitsverhältnisse  $R_p/m/R_z$  und  $R_p/R_{max}$  im Gleitkontakt mit einem glasfaserverstärkten PTFE-Verbundwerkstoff keine signifikanten tribologischen Kenngrößen darstellen (siehe Bild 6).



**Bild 16:**  
SRV-Versuchsplot  
Variante 4 gegen  
PTFE+GF gelaufen



**Bild 17:** 2D Profil der Verschleißoberfläche -  
Variante 4 gegen PTFE+GF gelaufen



**Bild 18:** REM-Verschleißbild – Variante 4  
gegen PTFE+GF gelaufen

### 3.2 Verschleißverhalten

Die aus dem SRV-Test ermittelte System-Verschleißhöhe wird für die Verschleißquantifizierung herangezogen. Die Charakteristik des Verschleißabtrages ist den SRV-Versuchsplots (siehe Bild 9, Bild 10, Bild 13 und Bild 16) zu entnehmen. Für die Bestimmung des Verschleißabtrages (siehe Zusammenstellung in Tabelle 3) wird das Verschleißverhalten im Einlaufbereich nicht berücksichtigt.

Grundkörper Oberfläche	Gegenkörper	System-Verschleißabtrag [ $\mu\text{m}$ ] / 120 min					
		0	10	20	30	40	50
1	PTFE+GF						
2	PTFE+GF						
3	PTFE+GF						
4	PTFE+GF						

**Tabelle 3:** Zusammenstellung des System-Verschleißabtrages  
der untersuchten Werkstoffpaarungen

Aus der Messung des System-Verschleißabtrages kann keine Zuordnung abgeleitet werden, an welchem der Reibpartner der Verschleiß auftritt. Zur Interpretation des System-Verschleißabtrages wird unter Zuhilfenahme der rasterelektronischen und weißlichtmikroskopischen Untersuchungsergebnisse eine Zuordnung des Verschleißortes/-volumen vorgenommen. So kann bei Variante 3 kein signifikanter Verschleiß an den Rauheitsspitzen festgestellt werden (siehe Bild 14), die Rauheitsspitzen bleiben in ihrer ursprünglichen Form weitestgehend erhalten. Dies bedeutet, dass der gesamte gemessene Verschleißabtrag bei Variante 3 dem PTFE+GF-Verbund zuzuordnen ist.

Im Gegensatz hierzu weist die Variante 2 keinen signifikanten PTFE-Transferfilm auf. Das Fehlen dieses PTFE-Transferfilmes ist möglicherweise auf die chemische Unverträglichkeit zur Grundkörper-Beschichtung zurückzuführen. Der Reibungskoeffizient ändert sich immer dann sprunghaft, wenn scharfkantige GF-Enden in Kontakt mit der Grundkörper-Oberfläche gelangen bzw. wenn der PTFE-Anteil im Kontakt für kurze Zeit seine Schmierfähigkeit zum Einsatz bringen kann, bevor er aufgrund der translatorischen Bewegung aus der Kontaktfläche heraus getragen wird. Es kann keine signifikante Veränderung der Oberflächenstruktur nach dem tribologischen Test festgestellt werden, sodass der in Tabelle 3 dargestellte Verschleißabtrag dem PTFE+GF-Verbund zugeordnet wird.

Aufgrund der geringen Oberflächenrauigkeit zeigt Variante 1 hinsichtlich des Verschleißabtrages ein vergleichbares Verhalten wie Variante 2, jedoch bildet sich im Unterschied zu Variante 2 ein partieller PTFE-Transferfilm, woraus ein stabiler Reibungskoeffizient im weiteren zeitlichen Verlauf des Tests resultiert. Die sehr glatte Oberfläche bleibt in ihrer ursprünglichen Form erhalten, sodass der gemessene Verschleißabtrag vom PTFE+GF-Verbund resultiert.

Die Kontaktzone von Variante 4 ist in Bild 18 dargestellt. Die Rauheitsspitzen wurden plastisch eingeglättet, welches zu einer Verringerung der maximalen Rautiefe von ca. 8 µm führt. Diese Einglättung der gestrahlten Oberfläche ist beschränkt auf die Einlaufphase des Tribosystems. Der Gesamtverschleißabtrag in der Einlaufphase beträgt ca. 25 µm, wobei der Verschleißabtrag des PTFE-GF-Verbundes ca. 17 µm beträgt. Beim Erreichen eines tribologisch stabilen Zustandes (d.h. wenn der Reibungskoeffizient nahezu konstant über die Zeit verläuft) wird nur noch vom glasfaserverstärkten PTFE-Verbundwerkstoff Material abgetragen und auf die gestrahlte Oberfläche übertragen. Auf diese Weise entsteht ein immer dichter PTFE-Transferfilm.

#### **4. Zusammenfassung**

Untersuchungen an Gleitpaarungen unterschiedlicher Oberflächen mit einem PTFE+GF-Verbundwerkstoff haben gezeigt, dass die Oberflächenrauheit einen signifikanten Einfluss auf die Wirksamkeit von PTFE besitzt. Gute PTFE-Wirksamkeit konnte bei rauen Oberflächen (Varianten 3 und 4) erzielt werden, weil PTFE eingelagert bzw. aufgetragen wurde, während sich bei glatten beschichteten Oberflächen kein stabiler PTFE-Transferfilm aufbauen konnte (Variante 1). Das Fehlen eines PTFE-Transferfilmes gibt außerdem einen Hinweis darauf, dass karbidische Dünnschichten möglicherweise eine chemische Unverträglichkeit zu PTFE besitzen (Variante 2). Im Gleitkontakt mit glasfaserverstärkten PTFE-Verbundwerkstoffen stellen somit raue metallische Oberflächen die tribologisch günstigere Lösung dar.

#### **5. Danksagung**

Die Forschungsergebnisse wurden aus dem österreichischen Kind- und COMET- Programm gefördert und sind im Österreichischen Kompetenzzentrum für Tribologie (AC<sup>2</sup>T) und bei V-Research entstanden. Die Autoren danken der Lingenhölle Technologie GmbH, Feldkirch und der Mawera Holzfeuerungsanlagen GmbH, Hard für die Bereitstellung des Themas und die Unterstützung der Forschungsarbeiten.

#### **6. Quellenverzeichnis**

- [1] F. Li, K.A. Hu, J.L. Li, B.Y. Zhao. The friction and wear characteristics of nanometer ZnO filled polytetrafluoroethylene. *Wear* 249:877-882, (2002).
  - [2] T. Tevrüz. Tribological behaviours of bronze-filled polytetrafluoroethylene dry journal bearings. *Wear* 230: 61-69, (1999).
-

- [3] W.G. Sawyer, K.D. Freudenberg, P. Bhimaraj, L.S. Schadler. A study on the friction and wear behaviour of PTFE filled with alumina nanoparticles. *Wear* 254:573-580, (2003).
  - [4] D.L. Burris, W.G. Sawyer. Improved wear resistance in alumina-PTFE nanocomposites with irregular shaped nanoparticles. *Wear* 260: 915-918, (2006).
  - [5] Z.Z. Zang, Q.J. Xue, W.M. Liu, W.C. Shen. Friction and wear properties of metal powder filled PTFE composites under oil lubricated conditions. *Wear* 210: 151-156, (1997).
  - [6] K. Tanaka. Effect of various fillers on the friction and wear of PTFE-based composites. In K. Friedrich (ed.), *Friction and Wear of Polymer Composites*, S.137-174. Elsevier, Amsterdam, (1986).
  - [7] T. Tsukizoe, N. Ohmae. Friction and wear of unidirectionally oriented glass, carbon, aramid and stainless steel fiber-reinforced plastics. In K. Friedrich (ed.), *Friction and Wear of Polymer Composites*: 205-232. Elsevier, Amsterdam, (1986).
  - [8] J. Khedkar, I. Negulescu, E.I. Meletis. Sliding wear behavior of PTFE composites. *Wear* 252: 361-369, (2002).
  - [9] E.-L. Yang, J.P. Hirvonen, R.O. Toivanen. Effect of temperature on the transfer film formation in sliding contact of PTFE with stainless steel. *Wear* 146: 367-376, (1991).
  - [10] Z. Zang, P. Klein, K. Friedrich. Dynamic mechanical properties of PTFE based short carbon fibre reinforced composites: experiment and artificial network prediction. *Composites Science and Technology* 62: 1001-1009, (2002).
  - [11] S. Jones, T.A. Stolarski, S. Tobe. Sliding performance of binary metal-PTFE coatings. *Wear* 257: 539-554, (2004).
  - [12] Z. Major, I. Godor, K. Resch. Some contributions to the characterization of the development of transfer film for PTFE compounds, Part I: study of the transfer film development of virgin PTFE. In: *Proceedings of Reibung und Verschleiß im Spannungsfeld von Fahrzeugherstellern und deren Kunden*: 221-226. Österreichische Tribologische Gesellschaft, Wien/Seibersdorf, (2004).
  - [13] W.A. Brainard, D.H. Buckley. Adhesion and friction of PTFE in contact with metal as studied by Auger spectroscopy, field ion and scanning electron spectroscopy. *Wear* 26: 75-93, (1973).
  - [14] E.-L. Yang, J.P. Hirvonen, M. Räsänen, O. Toivanen. Adhesion friction and wear between polytetrafluoroethylene and nitrogen-implanted stainless steel. *Surface and Coatings Technology* 51 (1-3): 146-151, (1992).
  - [15] O. Jacobs, R. Jaskulka, Ch. Tegethoff, G. Schlicke, J. Brand. Optimierung von Gleitpaarungen auf Kunststoffbasis für unterschiedliche Einsatzbedingungen. *Tribologie + Schmierungstechnik* 52 (2): 5-13, (2005).
  - [16] S. Bahadur. The development of transfer layers and their role in polymer tribology. *Wear* 245: 92-99, (2000).
  - [17] S.E. Franklin, A. de Kraker. Investigation of counterface surface topography effects on the wear and transfer behaviour of a POM-20% PTFE composite. *Wear* 255: 766-773, (2003).
  - [18] W. Wieleba. The statistical correlation of the coefficient of friction and wear rate of PTFE-composites with steel counterface roughness and hardness. *Wear* 252: 719-729, (2002).
  - [19] Gerätebuch  $\mu$ -Surf (Fa. Nanofocus)
  - [20] SRV-Bedienungsanleitung
-