

## Abstract

In recent years the field of polymer tribology experienced a tremendous development leading to an increased demand for highly sophisticated in-situ measurement methods. Therefore, advanced measurement techniques were developed and established in this study. Innovative approaches based on dynamic thermocouple, resistive electrical conductivity, and confocal distance measurement methods were developed in order to in-situ characterize both the temperature at sliding interfaces and real contact area, and furthermore the thickness of transfer films. Although dynamic thermocouple and real contact area measurement techniques were already used in similar applications for metallic sliding pairs, comprehensive modifications were necessary to meet the specific demands and characteristics of polymers and composites since they have significantly different thermal conductivities and contact kinematics. By using tribologically optimized PEEK compounds as reference a new measurement and calculation model for the dynamic thermocouple method was set up. This method allows the determination of hot spot temperatures for PEEK compounds, and it was found that they can reach up to 1000 °C in case of short carbon fibers present in the polymer. With regard to the non-isotropic characteristics of the polymer compound, the contact situation between short carbon fibers and steel counterbody could be successfully monitored by applying a resistive measurement method for the real contact area determination. Temperature compensation approaches were investigated for the transfer film layer thickness determination, resulting in in-situ measurements with a resolution of  $\sim 0.1 \mu\text{m}$ . In addition to a successful implementation of the measurement systems, failure mechanism processes were clarified for the PEEK compound used. For the first time in polymer tribology the behavior of the most interesting system parameters could be monitored simultaneously under increasing load conditions. It showed an increasing friction coefficient, wear rate, transfer film layer thickness, and specimen overall temperature when frictional energy exceeded the thermal transport capabilities of the specimen. In contrast, the real contact area between short carbon fibers and steel decreased due to the separation effect caused by the transfer film layer. Since the sliding contact was more and more matrix dominated, the hot spot temperatures on the fibers dropped, too. The results of this failure mechanism investigation already demonstrate the opportunities which the new measurement techniques provide for a deeper understanding of tribological processes, enabling improvements in material composition and application design.

## Kurzfassung

Der Bedarf an tribologisch optimierten Werkstoffen nimmt im Zuge immer höherer Anforderungen an energetisch optimierte Baugruppen stetig zu. Insbesondere sind polymere Verbundwerkstoffe aufgrund ihrer hervorragenden intrinsischen Eigenschaften im Fokus der Forschung. Neben einem geringeren Gewicht gegenüber metallischen Gleitpaarungen, den inhärenten Notlaufeigenschaften sowie günstigen Produktionskosten, zeichnet sie insbesondere die Möglichkeit aus, dass, mittels Variation diverser Füllstoffe, maßgeschneiderte Materialien für spezifische Applikationen hergestellt werden können.

Die Entwicklung von polymeren Verbundwerkstoffen findet oftmals auf abstrahierten Modellprüfständen statt. Hierbei werden üblicherweise makroskopische Gleiteigenschaften wie etwa die Reibkraft bzw. der Reibungskoeffizient sowie der Verschleiß gemessen. Zusätzlich werden vergleichsweise einfache Messungen, z.B. Oberflächentemperaturen von Probe und Gegenkörper, ermittelt. Weitergehende Untersuchungen finden zumeist ex-situ, d.h. nach Prüfung der Gleiteigenschaften, mittels zusätzlicher Analytik, wie Mikroskopie oder auch Profilometrie, statt. Die Erfassung solcher Informationen liefert niemals die Historie, sondern immer nur eine Momentaufnahme und ist mit erheblichem zusätzlichem Aufwand verbunden. Kontinuierlich gewonnene Informationen zur Historie von Parametern und tribologischen Kennwerten sind aber von großem Wert, um ein tieferes Verständnis des tribologischen Systems zu gewinnen. Gerade durch die steigende Anzahl möglicher Füllstoffe, welche sich in den letzten Jahren um eine Vielzahl von nanoskaligen Partikeln erweitert hat, ist es unerlässlich, Mechanismen und Struktur-Eigenschaftsbeziehungen detailliert abzubilden und zu überwachen. Dies ermöglicht die Durchführung einer kosteneffiziente Entwicklung von maßgeschneiderten Hochleistungspolymeren. Neben einer Verbesserung bestehender Werkstoffrezepturen könnten detaillierte Systemkenntnisse auch neue Wege in der Grundlagenforschung eröffnen.

Ingenieure und Werkstoffwissenschaftler wollen über einfach anwendbare und möglichst exakte Messmöglichkeiten verfügen, die ihnen eine effiziente Werkstoffentwicklung ermöglichen. Solche Messmethoden sind in der Polymertribologie noch wenig verbreitet. Jedoch gibt es bereits für metallische Reibpartner eine Vielzahl von Verfahren, welche Aufschlüsse über wichtige Systemparameter geben können. Ziel dieser Arbeit ist die systematische Entwicklung von neuen, in-situ fähigen Messmethoden zur Anwendung in kontinuierlichen Gleitprozessen zwischen polymerbasierten Verbundwerkstoffen und metallischem Gegenkörpern.

Bevor die eigentliche Entwicklung und Integration der neuen Messmethoden durchgeführt werden kann, war zunächst die theoretische Aufarbeitung des aktuellen Standes der Technik im Hinblick auf das tribologische System für polymere Verbundwerkstoffe und dessen Charakteristiken nötig. Hierdurch konnten wesentliche Parameter, welche für den Gleitprozess von entscheidender Bedeutung sind, herausgearbeitet werden. In einem nächsten Schritt wurden Messmethoden aus der Tribologie der Metalle analysiert; hierzu zählen Methoden zur Messung der realen Kontaktfläche zwischen beiden Gleitpartnern sowie der Dicke eines Zwischenstoffes und der Kontakttemperatur.

Auf dieser Basis wurden schließlich für die folgenden Kenngrößen Messmethoden ausgewählt und entwickelt, deren Transfer für polymere Verbundwerkstoffe vielversprechend erschien, wenn auch stellenweise eine starke Anpassung an die neuen Systemgegebenheiten erforderlich war:

- 1) Die elektrische Durchgangsleitfähigkeit der Gleitkontaktpaarung. Sie ist systembedingt abhängig von Reib- und Verschleißmechanismen, da Sie von der realen Kontaktfläche zwischen elektrisch leitfähigen Fasern und Reibpartner determiniert wird.
- 2) Die Entstehungshistorie von Tribofilmen (Zwischenschichten) auf dem Gegenkörper, die durch konfokale Distanzmessung erfasst und analysiert wurde.
- 3) Reale Kontakttemperaturen („Blitztemperaturen“), die durch Bildung eines dynamischen Thermoelements mittels der elektrisch leitfähigen Reibpartner ermittelt wurden.

Für 1) und 3) wurden neue theoretische Modelle erstellt, wobei die mathematische Beschreibung für die Berechnung von Kontakttemperaturen sowie der experimentelle Aufbau für die Validierung angepasst wurden. Aufgrund starker Diskrepanzen zwischen dem Stand der Technik und eigenen experimentellen Beobachtungen mussten insbesondere für die Messung der Kontakttemperaturen zusätzliche theoretische Überlegungen und praktische Experimente angestellt werden. Besonderes Augenmerk wurde auf die Auswirkungen äußerer Einflüsse gelegt. Bei der Dickenbestimmung des Zwischenstoffes mittels konfokaler Distanzmessung würde beispielsweise ohne Temperaturkompensation das Messergebnis vorrangig die Temperaturendeckung des Gegenkörpers liefern, da diese das eigentliche Messergebnis um bis zu zwei Dekaden überlagert.

Für jede der Messmethoden wurde nach erfolgter technischer Implementierung eine systematische Validierung durchgeführt. Unter verschiedenen, wechselnden Belastungszuständen gewonnene Messergebnisse wurden analysiert und mit anderen experimentellen Daten sowie Berechnungen korreliert.

Eine im Hinblick auf örtliches als auch zeitliches Auflösungsvermögen bislang nicht erreichte Performance mit einer Wiederholgenauigkeit von besser als  $0,1 \mu\text{m}$  konnte gezeigt werden. Die Bestimmung der Dicke eines Zwischenstoffes konnte nur für Trockenreibung etabliert werden.

Eine spezielle Versuchsreihe wurde mit einem Referenzwerkstoff durchgeführt, um die neu entwickelten Messmethoden kombiniert unter Trockenreibung mit Augenmerk auf den Versagenspunkt eines Materials unter steigender tribologischer Belastung einzusetzen. Der Werkstoff entsprach hierbei einem industriell eingesetzten Verbundwerkstoff auf Basis von Polyetheretherketon, gefüllt mit Kurzkohlenstofffasern, Graphit sowie Zinksulfid und Titaniumdioxid. Starke Abhängigkeiten zwischen Reibkoeffizient, Transferfilmdicke, realer Kontaktfläche sowie Kontakttemperatur waren ersichtlich. Damit konnte ein klares Verständnis dafür geschaffen werden, wie es zu einem thermischen Kollaps des tribologischen Systems durch Reibwärme oder durch zusätzlich eingebrachte thermische Energie kommt. Während eine steigende mechanische Belastung zu lokaler, mikroskopischer Überhitzung und somit zu schnell fortschreitendem Verschleiß führt, konnte für die von außen zugeführte thermische Wärmeenergie makroskopisches Versagen der Matrix als Auslöser für das finale Versagen des tribologischen Systems identifiziert werden.

Wie durch die beispielhafte Untersuchung gezeigt werden konnte, ermöglichen die neuen Messmethoden eine wirtschaftliche und tiefgreifende Untersuchung sowie online Überwachung von tribologischen Systemen. Struktur-Eigenschaftsbeziehungen können zukünftig noch besser korreliert werden, was eine optimale Materialentwicklung ermöglicht. Insbesondere die Erkenntnisse thermischer Systemeigenschaften können direkt bei der konstruktiven Auslegung von Gleitlagern angewendet werden.