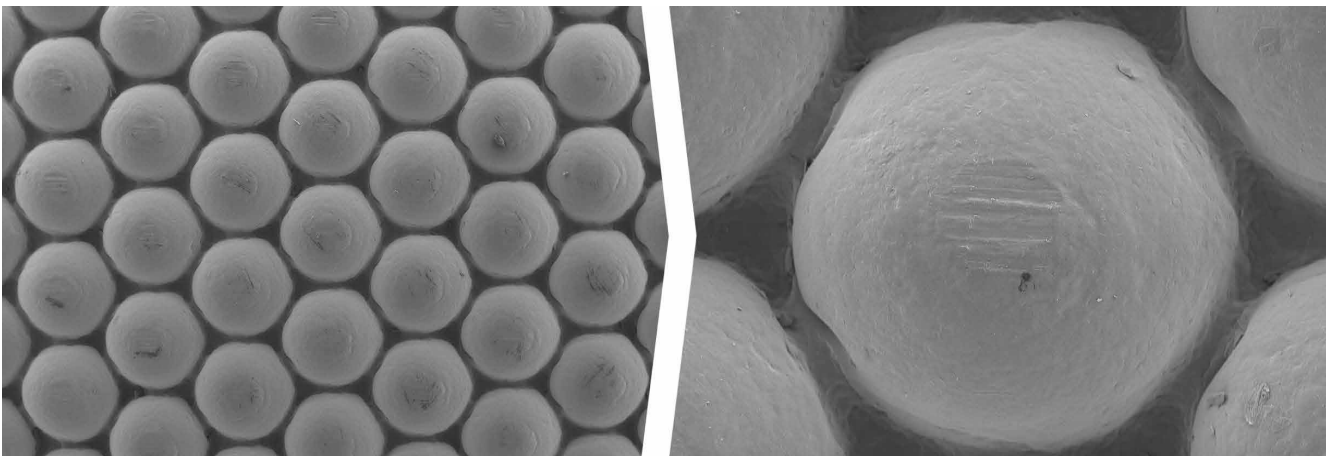


Berechnungsmodelle für die Auslegung von Oberflächenstrukturen

Strukturen vermindern Verschleiß und Kratzempfindlichkeit

Die Schmierung durch Öle oder Gleitmittel kann zur Minimierung von Verschleiß bei Kunststoffen zum Einsatz kommen – ist allerdings nicht bei allen Anwendungen möglich oder erwünscht. Hier kann die Strukturierung der Oberflächen von Kunststoffbauteilen helfen. Ein neues Rechenmodell zeigt einen Weg zur Entwicklung tribologisch optimierter Produktoberflächen.



Kaum Verschleiß auf Kalotten: Mikroskopieaufnahmen einer reibbelasteten Struktur.

© Institut für Kunststofftechnik Darmstadt

Zusammenarbeit: Der Bereich Förder- und Materialflusstechnik der TU Chemnitz und die Abteilung Werkstofftechnik der Kunststoffe der Hochschule Darmstadt haben sich im Projekt OstriA zusammengeschlossen.

Im Kern geht es um die Wirkungsweise von Strukturen. Diese werden systematisch untersucht und Zusammenhänge zwischen Strukturen und Reib- sowie Kratzverhalten abgeleitet. Ziel ist dabei die Minimierung der Sichtbarkeit von Kratzern [1,2] und die Reduktion von Reibwerten durch Strukturen sowie die Ableitung von Auslegungsregeln für strukturierte Oberflächen [3,4,5,6] – nicht etwa die eher unrealistische Vermeidung von Kratzern oder Reibeffekten.

Die Strukturen werden durch Spritzgießen in Anlehnung an ISO 294–3 mit einem Werkzeug für die Herstellung von

Campus-Platten (Typ D12 nach ISO 20753) hergestellt, in das Werkzeugsätze eingefügt werden können. Mit einem Einsatz können gleichzeitig sechs Strukturen auf einer Fläche von jeweils 10 x 15 mm realisiert werden.

Herstellung von strukturierten Oberflächen

Die Strukturen werden durch Mikrofräsen oder Laserablation gefertigt und basieren auf Kalotten (**Bild 1**), Pyramiden und Erodierstrukturen nach VDI-Richtlinie 3400. Bei den Kalottenstrukturen sind Durchmesser, Abstand und Anordnung der Kalotten in einem rechteckigen oder hexagonalen Gitter variiert worden. Bei den Pyramiden sind die variablen Größen die Kantenlänge der Pyramidengrundfläche sowie der Anstiegswinkel der Kanten und dadurch bei gleicher

Kantenlänge die Pyramidenhöhe. Für grundlegende Reibungsuntersuchungen sind Einzel- und Mehrfachkontakte definiert worden.

In Voruntersuchungen sind Werkzeugtemperatur, Einspritzgeschwindigkeit und Zylindertemperatur identifiziert worden, bei denen sowohl die Entformbarkeit als auch die Abformgenauigkeit in den Strukturhebungen maximal sind.

Für die strukturierten Platten sind POM (Hostaform C9021 von Celanese), ein für tribologische Anwendungen oft verwendeter Werkstoff, und PP-MX22 (Polyfort FPP 22 T LE K1684 von Lyondell-Basell), das typischerweise für Anwendungen in Automobilinnenräumen zum Einsatz kommt, verwendet worden. PE-UHMW (Polystone M-Natur von Röchling), das zum Beispiel in der Fördertechnik eingesetzt wird, wird in Form von

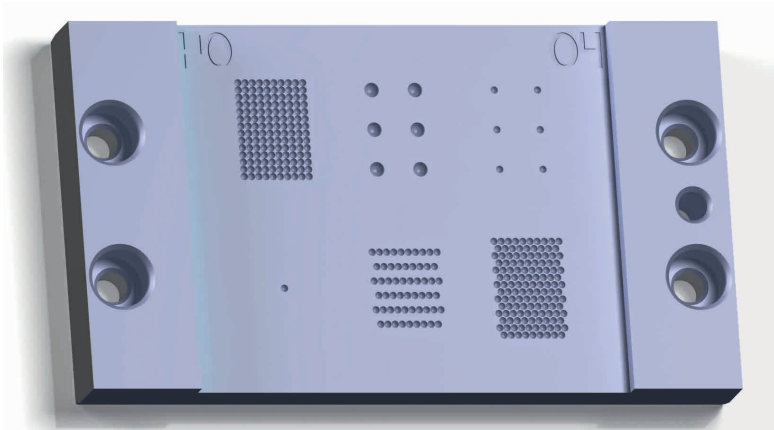


Bild 1. Einsatz für ein Spritzgießwerkzeug mit sechs verschiedenen Kalottenstrukturen (rechteckiges Gitter oben links, hexagonales Gitter unten rechts). © Institut für Kunststofftechnik Darmstadt

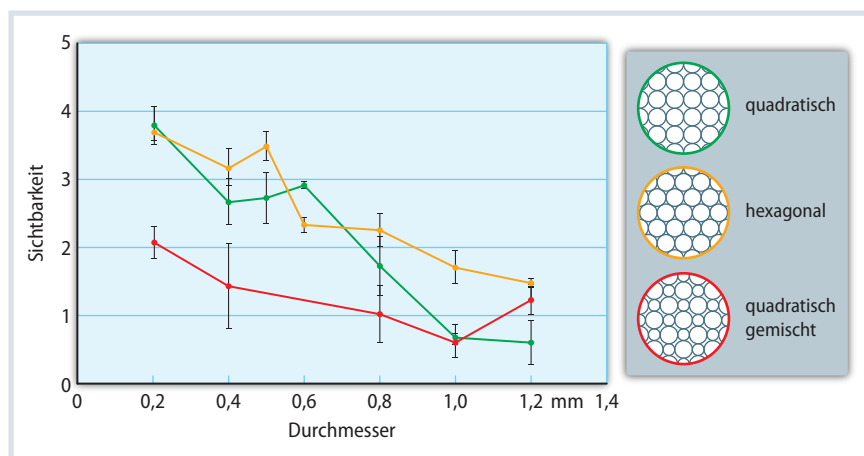


Bild 2. Die Sichtbarkeit unterschiedlicher Anordnungen sich berührender Kalotten als Funktion des Kalottendurchmessers. © Institut für Kunststofftechnik Darmstadt

Platten und Stäben als Gegenkörper für Reibversuche verwendet.

Die Kratznadel auf Kollisionskurs

Kratzer sind mit dem Kratzprüfgerät UST 1000 von Innowep [7,8,9] mit definierter Normalkraft von 400 mN und Kratzgeschwindigkeit von 2 mm/s bei gleichzeitiger Messung von Eindringtiefe und Tangentialkraft erzeugt worden. Als Kratznadel ist ein Stahlkegel mit einem Öffnungswinkel von 90° und einem Spitzenradius von 40 mm gewählt worden. Ergebnisse sind unter anderem die Topographie der Oberfläche, die bleibende Eindringtiefe des Kratzers und Reibwerte.

Nach dem Kratzen sind die Strukturen mittels Mikroskop (Axio Imager M2m von Zeiss) untersucht und visuell in einer Lichtkabine bei Normlichtart D65 von mehreren Personen bezüglich ihrer Sichtbarkeit anhand von Referenzplatten

auf einer Skala von 0 (nicht sichtbar) bis 5 (deutlich sichtbar) bewertet worden.

Es zeigt sich, dass Kratzer umso sichtbarer sind, je mehr der Kalotten- oder Pyramidenspitzen mit der Kratznadel in Kontakt kommen. Bewegt sich die Kratznadel im Tal zwischen Strukturerehebungen, wird sie bei ähnlicher Größe von Kratznadel und Struktur durch die Strukturflanken abgestützt und Kratzer entstehen kaum oder sind kaum sichtbar. Die Sichtbarkeit korreliert daher mit den durch das UST 1000 quantifizierbaren Messgrößen nur in geringem Maße. Die wesentlichen Ergebnisse sind:

- Kratzer auf ebenen Oberflächen und Oberflächen, die durch eine sehr große Überlappung von Kalotten oder Pyramiden (also quasi ebene Oberflächen) entstehen, sind am besten sichtbar (Sichtbarkeit 5).
- Haben Kalotten einen Abstand von einem halben Kalottendurchmesser, sinkt die Sichtbarkeit auf bis zu 1,3.

- Wird der Kalottendurchmesser bei aneinandergrenzenden Kalotten größer, sinkt die Sichtbarkeit unter den Wert 2 unabhängig von der Anordnung der Kalotten.
- Strukturen aus Kalotten mit unterschiedlich großen Durchmessern weisen eine geringere Sichtbarkeit auf als Strukturen aus Kalotten mit nur einem Durchmesser (Bild 2).
- Bei Pyramiden sinkt die Sichtbarkeit bei spitzer werdenden Pyramiden. Auch eine größere Kantenlänge führt zu einer Verringerung der Sicht- »

Info

Text

Prof. Dr.-Ing. Martin Moneke ist Professor für „Werkstofftechnik der Kunststoffe“ martin.moneke@h-da.de,
Timo Bensing, M.Sc., ist wissenschaftlicher Mitarbeiter,
 beide am Institut für Kunststofftechnik der Hochschule Darmstadt.
Dipl.-Ing. André Bergmann ist wissenschaftlicher Mitarbeiter,
Dr.-Ing. Niels Dallinger ist wissenschaftlicher Mitarbeiter,
Dr.-Ing. Jens Sumpf ist Gruppenleiter Kunststoffkomponenten und Tribologie jens.sumpf@mb.tu-chemnitz.de,
 alle am Institut für Fördertechnik und Kunststoffe der TU Chemnitz.

Dank

Das IGF-Vorhaben 20967 BG der Forschungsvereinigung Forschungsgesellschaft Kunststoffe e.V. (FGK) wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung. Ebenso gilt der Dank der Forschungsgesellschaft Kunststoffe e.V. (FGK) und der kooperierenden Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) sowie den im projektbegleitenden Ausschuss vertretenen Unternehmen für ihre fachliche Unterstützung.

Literatur & Digitalversion

Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/onlinearchiv

Bild 3. Mit dem Modell berechnete Reibungsanteile sowie der Gesamtreibwert der Paarung Stahlkugel gegen PE-UHMW-Ebene. © Institut für Fördertechnik und Kunststoffe, TU Chemnitz

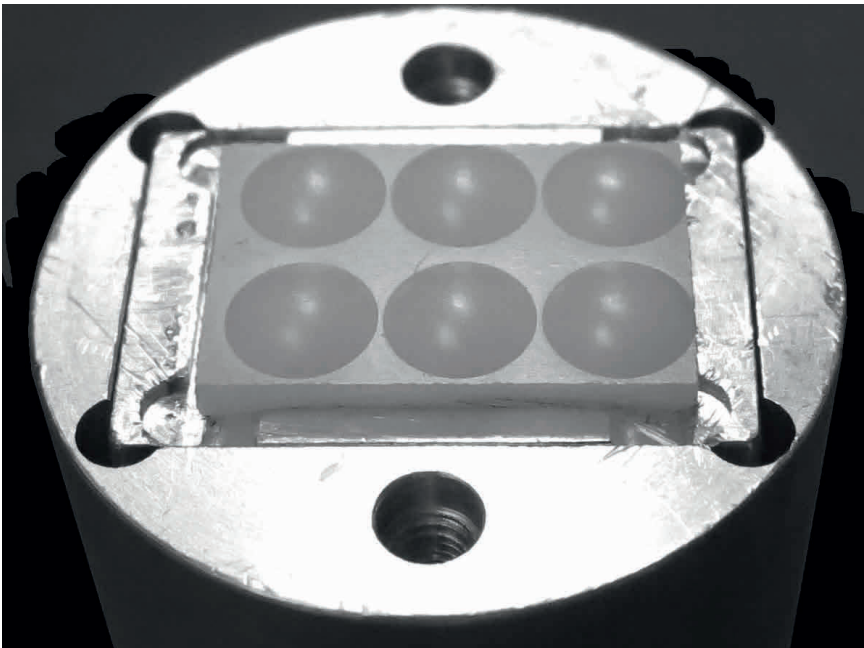
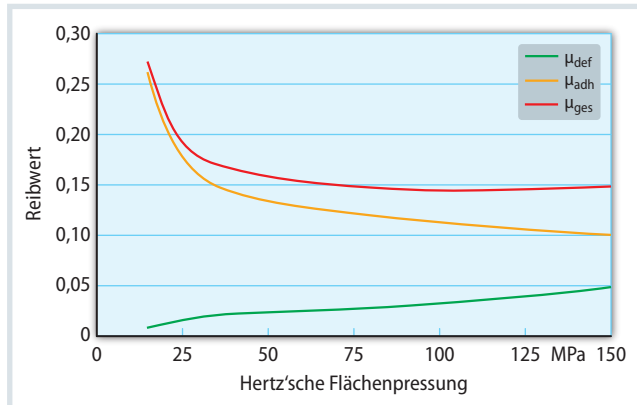


Bild 4. Probekörper mit 6-teiliger Kugelstruktur aus POM © Inst. für Fördertechnik und Kunststoffe, TU Chemnitz

barkeit. Auch bei Pyramiden führen Mischstrukturen zu einer geringeren Sichtbarkeit.

- Bei Erodierstrukturen führen Mittenrauwerte mit $Ra > 70 \text{ nm}$ zu einer Sichtbarkeit kleiner 1.

Reibung und semi-analytisches Berechnungsmodell

Die Reibungs- und Verschleißseigenschaften trocken laufender Kunststoffgleitpaarungen können durch eine gezielte Strukturierung der Oberflächen gegenüber ebenen Kontaktflächen signifikant verbessert werden [10–15]. Als Projektziel wurde die Untersuchung und anwendungsnahe Berechnung dieses Phänomens definiert. Bei der normalbelasteten Tangentialbewegung der Kugeln durch eine Oberfläche aus PE-UHMW wird diese elastisch, visko-

elastisch und gegebenenfalls plastisch deformiert. Dabei entsteht an der in Bewegungsrichtung vor dem Kugelmittelpunkt liegenden Hälfte ein vollflächiger Kontaktbereich.

Das verformte Material hinter der Kugelmittelpunkt bildet sich jedoch nur zeitverzögert und zum Teil unvollständig zurück, sodass diese Kontaktfläche deutlich reduziert ist. Nach einem Ansatz von Lafaye [16] ergeben sich aus diesen Kontaktbeziehungen beim einmaligen Durchfurchen einer Ebene zwei virtuelle Flächen: eine tangentiale und eine normale, deren Verhältnis den deformativen Reibungsanteil repräsentiert.

Dieser Ansatz wurde auf elliptische Kontaktflächen erweitert, da sich im stationären Zustand nach längerer Belastungsdauer in der Gegenfläche eine plastisch verformte Rinne ausbildet, in der die Kugel nur elastische und visko-

elastische Verformungen hervorruft. Der Modellansatz wurde durch empirisch ermittelte Koeffizienten ergänzt, indem systematisch der adhäsive und deformative Reibungsanteil sowie die unter Last auftretende Eindringtiefe der Kugel bei unterschiedlichen Geometrie- und Lastbedingungen ermittelt wurden.

Die experimentellen Untersuchungen zeigten, dass eine Erhöhung der Normalkraft zu einem leichten Anstieg des deformativen Reibungsanteils führt. Ausschlaggebend für den insgesamt sinkenden Gesamtreibwert ist jedoch der dominierende adhäsive Anteil, der vor allem bei kleinen Kräften über der Normalkraft deutlich abfällt.

Das weitreichend experimentell validierte Modell ermöglicht die Berechnung der Reibungsanteile für kugelförmige Strukturierungen aus Stahl und POM im trockenen, tribologischen Kontakt mit PE-UHMW unter hohen Kontaktdrücken (**Bild 3**). Als Eingangsparameter wird zur leichten Handhabung lediglich die mit dem Kugelradius bestimmte Hertz'sche Flächenpressung Kugel-Ebene verwendet. Nach ersten Untersuchungen ist das Modell auch auf Mehrfachkontakte (**Bild 4**) und damit auf entsprechend strukturierte Oberflächen anwendbar. Zur Erweiterung auf andere Werkstoffe müssen die enthaltenen paarungsabhängigen Koeffizienten durch ausgewählte Versuche ermittelt werden.

Mithilfe von FEM Simulationen wird das Berechnungsmodell bestätigt

Aufgrund der viskoelastischen Materialeigenschaften und des dynamischen Charakters der zu untersuchenden Prozesse werden für alle Simulationen explizite/dynamische Solver verwendet. Die Kalibrierung der Randbedingungen erfolgte mittels 2D-Modellen.

Hier handelte es sich um rotationsymmetrische Indentierungsversuche mit einzelnen Kratzspitzen beziehungsweise Kugelkallotten. Die Materialmodelle wurden softwaregestützt mittels MCalibration optimiert.

Im Weiteren wurden 3D-FE-Modelle für verschiedene Reib- und Kratzprozesse erstellt. Der Fokus lag hierbei auf den Modellen für die Reibversuche und den deformativen Reibanteilen.

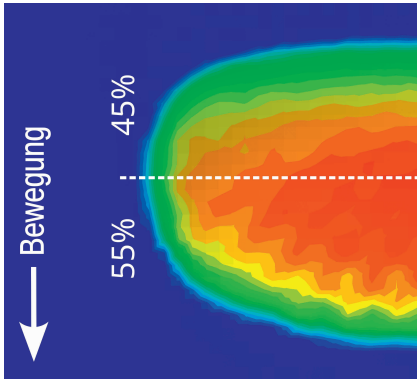


Bild 5. Druckverteilung unterhalb der Kugelkalotte während der Reibbewegung. © Institut für

Fördertechnik und Kunststoffe, TU Chemnitz

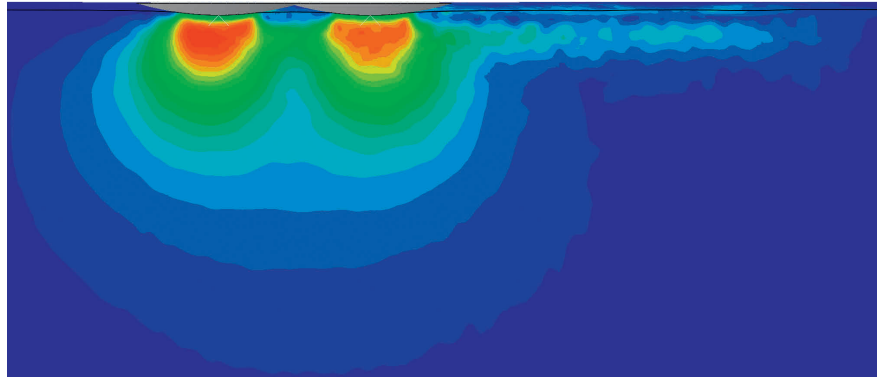


Bild 6. Spannungsverteilung des Doppelkontakts während der Reibbewegung.

© Institut für Fördertechnik und Kunststoffe, TU Chemnitz

Größtes Problem bildete dabei die numerische Abbildung der Langzeitreibwerte. Durch die CAD-Modellierung der mikroskopisch vermessenen Rinnegeometrie nach 24 h Reiben konnten die geometrischen Verhältnisse im Kontakt zwischen Rinne und Kugelkalotte nachgebildet werden. Allerdings sind die Verformungsrinnen abhängig von Normallast, Werkstoffpaarung (Stahl oder POM-C gegen PE-UHMW) und Kalottendurchmesser, was zu einer großen Anzahl von Modellen führte. Mit den FEM-Ergebnissen konnte der geometrische Modellansatz des semi-analytischen Berechnungsmodells

bestätigt (**Bild 5**) und der deformative Reibanteil quantitativ abgebildet werden.

Aus diesen Untersuchungen wurden 3D-Modelle für den Mehrfachkontakt zwischen verschiedenen Musterstrukturen und der Kunststoffebene abgeleitet. **Bild 6** zeigt am Beispiel Doppelkontakt die unterschiedlichen Spannungsverteilungen in der PE-UHMW Unterprobe. Aus den Ergebnissen der noch anstehenden Mehrfachkontakt-Parameterstudien werden zukünftig Designrichtlinien für die Auslegung reibungsreduzierter Kontaktstrukturen abgeleitet.

Fazit

Sowohl die Kratz- wie Reibuntersuchungen als auch die analytische und numerische Berechnung sind sehr erfolgreich angewandt worden. Das Ziel der Aufklärung von Struktur-Eigenschaftsbeziehungen und der Ableitung von grundsätzlichen Regeln für die Auslegung von Strukturen ist erreicht worden. Es stehen analytische und numerische Modelle zur Verfügung, die auf andere Werkstoffe und Anwendungen übertragbar sind. Die Erkenntnisse zu strukturierten Oberflächen weisen den Weg für neue, tribologisch optimierte Produktoberflächen. ■