

Mit PEEK energieeffizientere und geräuschärmere Zahnräder konstruieren

Den Rädern auf den Zahn gefühlt

Hochleistungskunststoffe wie Polyetheretherketon (PEEK) bieten viele interessante Eigenschaften zur Verbesserung von Zahnrädern. Für den Einsatz sind jedoch genaue Aussagen über die relevanten Kennwerte entscheidend. Der Kunststoffhersteller Evonik hat entsprechende Untersuchungen für PEEK durchgeführt. Die Erkenntnisse führten unter anderem zum ersten Einsatz von PEEK-Zahnrädern in Getrieben für Fahrzeuge von Mercedes-Benz.



Das Massenausgleichszahnrad aus Vestakeep 5000 G ist das erste in Getrieben von Mercedes-Benz verwendete Zahnrad aus Kunststoff. Es ersetzt die bisher dort verwendeten Modelle aus Metall.

© Evonik

In vielen technischen Anwendungen ersetzen Zahnräder aus Kunststoffen klassische Metallzahnräder. Sie sind leichter und leiser, weisen gute Trockenlaufeigenschaften sowie wenig Reibung und Verschleiß auf und können effizient hergestellt werden. Im Vergleich zu Zahnrädern aus technischen Kunststoffen sind Varianten aus

Hochleistungskunststoffen wie Polyetheretherketon (PEEK) in der Regel mechanisch, thermisch und chemisch stabiler und können deshalb die Belastungsgrenze erweitern. Eine qualifizierte Bewertung und die kunststoffgerechte Auslegung der Bauteile sind dabei eine entscheidende Voraussetzung. Der Kunststoffhersteller Evonik hat das für

Zahnräder aus PEEK in verschiedenen Analysen untersucht.

2018 hat das Unternehmen in Darmstadt ein Tribologiekompetenzzentrum eingerichtet, um Hochleistungskunststoffe wie PEEK, Polyamid 12 (PA12) oder Polyimid (PI) für tribologisch beanspruchte Bauteile gezielt weiterzuentwickeln. Neben klassischen Methoden wie Pin-on-Disk- und Kugel-Scheibe-Prüfungen (via Mini Traction Machine) wurde ebenfalls ein neuartiger Prüfstand installiert (**Bild 1**).

Prüfstand ermöglicht Bewertung von Kunststoffzahnrädern

Das Reibungs- und Verschleißverhalten eines Zahnrads hängt in komplexer Weise von der spezifischen, lokalen Beanspruchung im Kontakt mit einem Stahlritzel und den Umgebungsbedingungen im Betrieb ab. Modellversuche wie Pin-on-Disk und die Kombination mit klassischen statischen und dynamischen mechanischen Versuchen an genormten Prüfkörpern lassen aufgrund der besonderen Eingriffsverhältnisse bislang keine adäquate Bewertung des Verhaltens eines Kunststoffzahnrads im Betrieb zu [1]. Im Komponententest des neuen Zahnradprüfstands können hingegen an Kunststoffzahnrädern bauteilspezifische Kennwerte für die Auslegung ermittelt werden. Unter definierter Drehmomentbelastung, Drehzahl und Temperatur wird mit einem angetriebenen Metallritzel eine dynamische tribologische und mechanische Wechsellast auf die Kunststoffzähne aufgebracht. Dabei ist ein Vergleich von beispielsweise mit Öl oder Fett geschmierten und

trockenlaufenden Kunststoffzahnradern möglich.

Die Prüfung erfolgt nach der Richtlinie VDI 2736-4 („Thermoplastische Zahnräder: Ermittlung von Tragfähigkeitskennwerten an Zahnradern“), um Ergebnisse wie Zahntragfähigkeiten und Verschleißkoeffizienten mit unterschiedlichen Belastungskollektiven zu bestimmen. Diese Ergebnisse werden als Rohdaten in professionellen Simulationsprogrammen zur Zahnradauslegung eingesetzt, um Kunden bei der optimalen Auslegung unterstützen zu können. Die Prüfung erfolgt dabei üblicherweise bis zum Versagen des Zahnrad durch Verschleiß der Zahnflanken oder Zahnfußbruch. Dabei beeinflusst die Zahnfußtemperatur die ertragbaren Lastwechsel. Die Temperatur kann daher im vorhandenen Prüfstand über einen IR-Sensor ermittelt und geregelt werden.

PEEK überzeugt bei Mechanik und Chemikalienbeständigkeit

Bei der Entwicklung von Hochleistungskunststoffen für Zahnräder sind je nach Beanspruchung unterschiedliche mechanische, thermische und tribologische Anforderungen möglichst ausgewogen in Einklang zu bringen. Dabei kann es durch bestimmte Materialmodifikationen zu antagonistischen Auswirkungen auf das Zahnradverhalten kommen. Teilweise haben etwa Additive für

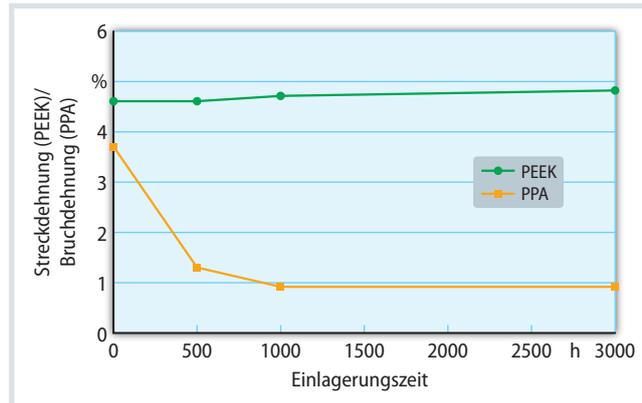


Bild 2. Streckdehnung von PEEK und Bruchdehnung von PPA nach Vollkontaktlagerung in Getriebeöl bei 150 °C: Das PPA zeigt bereits nach kurzer Zeit stark reduzierte Werte. Bei PEEK bleibt die Dehnung hingegen konstant.

Quelle: Evonik; Grafik: © Hanser

verbesserten Verschleißschutz oder verringerte Reibung je nach Partikelbeschaffenheit und Anbindungsmöglichkeiten an die Kunststoffmatrix negative Auswirkungen auf das dynamisch-mechanische Verhalten eines Zahnrad, falls sie als Fehlstellen oder Rissinitiatoren wirken.

Im Vergleich zu technischen Kunststoffen wie Polyoxymethylen (POM), PA6 oder PA66 besitzt der Hochleistungskunststoff PEEK als Werkstoff für Zahnräder viele Vorteile. Insbesondere kann er auch bei hohen Temperaturen hohe Lasten übertragen [2]. Aufgrund der praktisch vernachlässigbaren Wasseraufnahme und geringer Schwindung und Nachschwindung sind Formteile sehr dimensionsstabil und infolge der Molekülstruktur des Thermoplasten außerordentlich chemikalienbeständig. Das

zahlt sich aus, wenn Zahnräder mit Motor- oder Getriebeölen geschmiert werden; eine für viele Kunststoffe aggressive Umgebung.

Keine Änderung bei Öllagerung

Am Beispiel der Dehnung nach Vollkontaktlagerung in Getriebeöl (**Bild 2**) konnte nachgewiesen werden, dass PEEK (Typ: Vestakeep 4000 G von Evonik) weitaus beständiger ist als Polyphthalamid (PPA, Typ: Vestamid HTplus, ehemals hergestellt von Evonik), ein hochtemperaturstabiles teilaromatisches PA. Während sich bei PEEK die Streckdehnung nicht ändert, zeigt das geprüfte PPA bereits nach 500 h Lagerung deutliche Verluste bei der Bruchdehnung. Das Versprödungsmerkmal für PEEK ist die Streckdehnung, für PPA aufgrund der fehlenden Streckdehnung die Bruchdehnung. Zusätzliche Prüfungen der Schlagzähigkeit unterstrichen das mechanische Versprödungsverhalten.

Die im Vergleich zu vielen technischen Kunststoffen sehr hohe mechanische und thermische Stabilität von PEEK macht sich bei Zahnradanwendungen bezahlt. Das verdeutlichen die Prüfungen von Zahnradern aus hochmolekularem, duktilen PEEK mit dem beschriebenen Prüfstand in einer trockenen Paarung sowie im motorölgeschmierten Zustand bei 80 und 130 °C (**Bild 3**). Dabei wurde ein Kunststoffzahnrad mit einer Drehzahl von 650 U/min durch ein Stahlritzel definierter Oberflächenhärte und Rauheit angetrieben. Das Ergebnis: Ölgeschmiertes PEEK kann eine sehr hohe Belastung über eine lange Lebensdauer übertragen. Im Trockenlauf ist der Verschleiß die vorwiegende Versagensart, während im ölgeschmier-

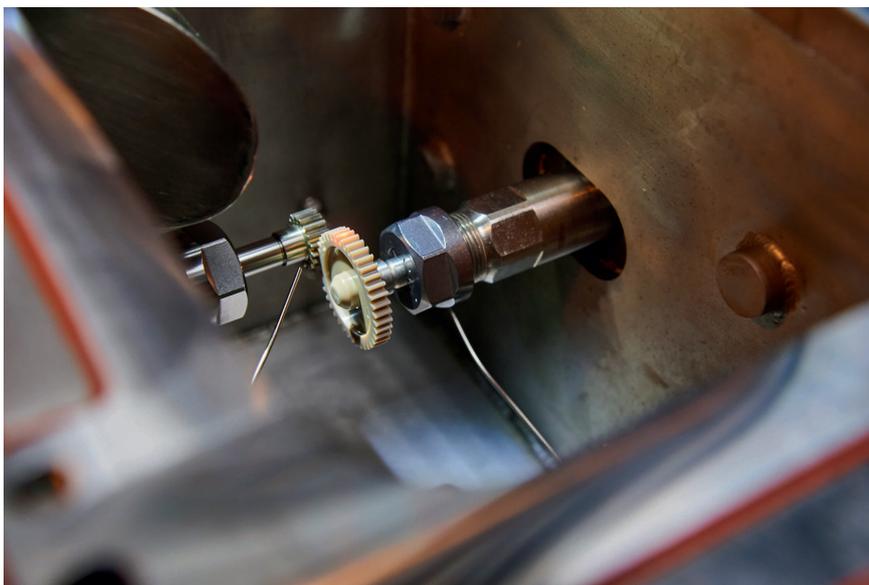


Bild 1. Zahnradprüfstand für Kunststoffzahnräder in Evoniks Tribologiekompetenzzentrum in Darmstadt: Mit diesem lassen sich bauteilspezifische Kennwerte für die Auslegung der Zahnräder ermitteln. © Evonik

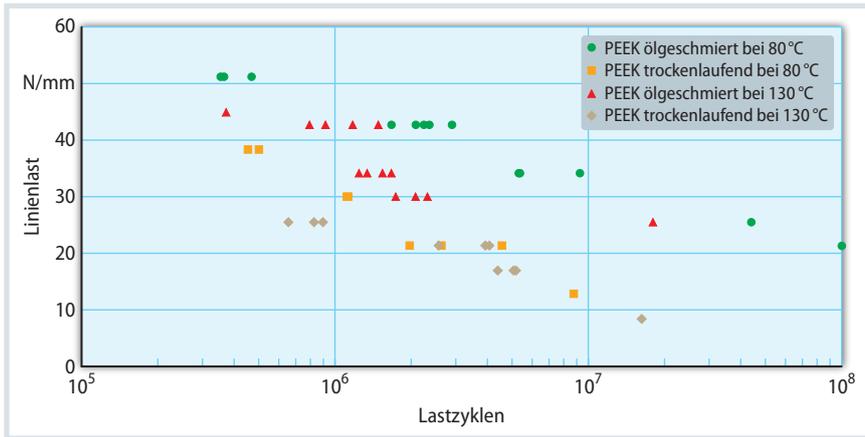


Bild 3. Mechanische Prüfung eines Zahnrads aus Vestakeep 5000 G: Vor allem ölgeschmierte PEEK-Zahnräder können eine hohe Last über viele Zyklen übertragen. Quelle: Evonik; Grafik: © Hanser

ten Zustand aufgrund Ermüdung der Zahnfußbruch dominiert.

Geringere Reibung mit PEEK

Weitere Vorteile von PEEK sind seine sehr guten tribologischen Eigenschaften mit niedrigen Verschleiß- und Reibungskoeffizienten [3]. Letzterer sorgt sowohl im Trockenlauf als auch im geschmierten Zustand für Energieeinsparungen in der Anwendung. Das konnte in einem weiteren Experiment nachgewiesen werden (**Bild 4**). Bei dem Kugel-Scheibe-Experiment in Motoröl bei 23 und 130 °C wurde der Reibungskoeffizient von Stahl zu Stahl und PEEK zu Stahl mithilfe einer

Stahlkugel mit 9,5 mm Radius und jeweils einer Stahl- und PEEK-Scheibe untersucht. Die Kugel wurde in diesem Experiment mit 30 N belastet und mit einem Schlupf von 25 % betrieben, was die Prüfung von Gleit- und Rollbewegungen der beiden Kontaktpartner ermöglichte.

Die erhaltenen sogenannten Striebeck-Kurven zeigen, dass mit einer PEEK-Stahl-Paarung im ölgeschmierten System sehr energieeffiziente Lösungen realisierbar sind. Sowohl in der Grenzreibung, dem Zustand bei niedriger Geschwindigkeit mit kaum Schmierfilm zwischen den Kontaktflächen, als auch im hydrodynamischen Bereich, dem Zustand bei hoher Geschwindigkeit mit vollständigem Schmierfilm zwischen den Kontaktflächen, ist der Reibungskoeffizient bei Stahl auf Stahl um den Faktor vier bis sieben höher. Das erklärt sich unter anderem durch das viskoelastische Verhalten von PEEK und der dadurch

bedingten geringeren Hertzschen Pressung im Kontakt [4].

Das viskoelastische Verhalten und die damit einhergehende gute Dämpfung von PEEK sind auch der Grund für das sehr angenehme Geräuschverhalten. Leise Getriebe werden vor allem in Elektrofahrzeugen zunehmend relevant, da das Geräusch des Verbrennungsmotors entfällt. Ein PEEK-Stahl-Kontakt reduziert in einem fettgeschmierten Schraubradgetriebe den Luftschall teilweise um mehr als 10 dB (**Bild 5**). Die Messung erfolgte am Lehrstuhl für Industrie- und Fahrzeugantriebstechnik (IFA) der Fakultät für Maschinenbau der Ruhr-Universität Bochum.

Mercedes-Benz: Kunststoff statt Metall

Die gezeigten Vorteile führten zur Serienanwendung von PEEK-Zahnrädern in einem Massenausgleichsgetriebe hergestellt für Mercedes-Benz (**Titelbild**). Es handelt sich um das erste PEEK-Kunststoffzahnrad in dieser sehr anspruchsvollen Motorapplikation, die bisher ausschließlich Metallzahnrädern vorbehalten war. Umfangreiche Tests und die Evaluierungen kompetenter Partner für die Herstellung ermöglichten den Einsatz von PEEK in dieser schwierigen Umgebung. Die Zahnräder werden kostengünstig und maßhaltig im Spritzgießverfahren hergestellt. Dadurch entfällt die umfangreiche Nachbearbeitung, die bislang beim Einsatz von Metallen erforderlich war. Zudem kann durch das geringere Massenträgheitsmoment beim Fahren Energie eingespart und eine sehr hohe Laufruhe sowie ein geringes Geräuschverhalten gewährleistet werden [5].

Info

Text

Dipl.-Ing. Philipp Kilian ist Head of Tribology Development High Performance Polymers bei der Evonik Operations GmbH. **Prof. Dr.-Ing. Karl Kuhmann** ist Director Polymer Technology Development High Performance Polymers bei Evonik Operations.

Kontakt

Evonik Operations GmbH
www.vestakeep.de

Literatur & Digitalversion

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

English Version

Read the English version of the article in our magazine *Kunststoffe international* or at www.kunststoffe-international.com

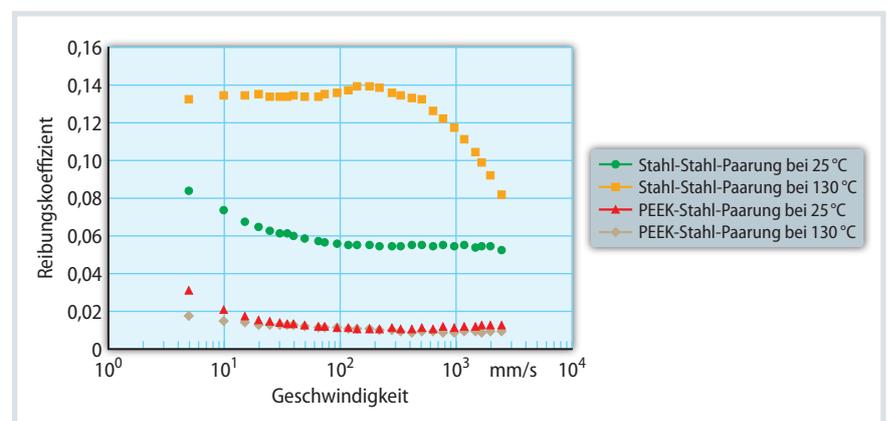
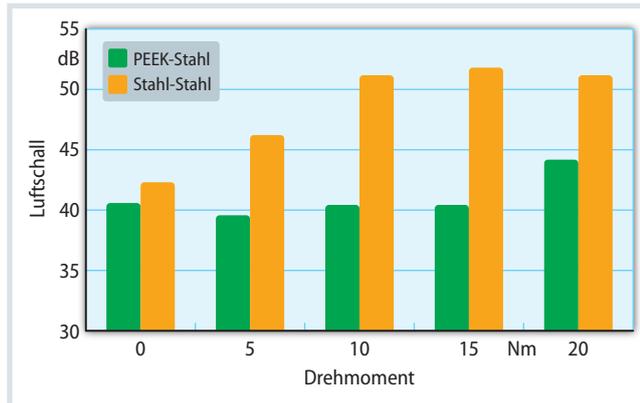


Bild 4. Reibungskoeffizient von Stahl-Stahl- und PEEK-Stahl-Paarungen in Motoröl: Der Koeffizient ist beim Einsatz des Hochleistungskunststoffs Vestakeep 5000 G deutlich geringer. Quelle: Evonik; Grafik: © Hanser

Bild 5. Luftschallmessung in einem Schraubradgetriebe an einer fettgeschmierten PEEK-Stahl- und einer Stahl-Stahl-Paarung bei 3000 U/min: Die Geräuschbelastung ist bei PEEK teilweise mehr als 10 dB geringer. Quelle: Evonik; Grafik: © Hanser



Vorteilhaft wird sich dabei der 3D-Druck erweisen. Dieser macht weitere Applikationen möglich. Ein verstärkter Einsatz von hybriden Lösungen sowie die Integration zusätzlicher Funktionen wie Kühl- oder Schmierkanäle bieten darüber hinaus weitere Optionen. Vor allem die ausgereifte Mehrkomponentenspritzgießtechnik eröffnet große Designfreiheit bei der Zahnradgestaltung. Dadurch lassen sich beispielsweise Varianten realisieren aus verschleißoptimierten Kunststoffen im Bereich der Zahnflanken, mit zähen Kunststoffmodifikation im Zahnfußbereich und metallischen oder hochbelastbaren, faserverstärkten Kunststoffen im Bereich von Lastspitzen. Sie sind sehr wirtschaftlich und präzise etwa in Drehwerkzeugen produzierbar. Darüber hinaus eröffnen intelligente Werkstoffentwicklungen auf Basis von PEEK durch gezielte Verstärkung und Additivierung die Möglichkeit, tribologische Systeme ohne Fremdschmierstoff energie- und werkstoffeffizient auszulegen. ■

Zusammenfassung und Ausblick

Vom Einsatz im klassischen Automobilbau bis zu Robotern oder Drohnen – die möglichen Anwendungen von Zahnradern aus Kunststoff sind vielfältig. Hochleistungskunststoffe wie PEEK erweitern dabei den Einsatzbereich von Kunststoffzahnradern in Getrieben zu höheren Drehmomenten, Drehzahlen

und Temperaturen. Dazu müssen sie in einem kunststoffgerechten Design ausgelegt werden, um sie letztlich in kleineren, leichteren und energieeffizienteren Aggregaten einzusetzen. Die vorteilhaften Eigenschaften des Polymers werden den Einsatz von PEEK-Zahnradern in der Elektromobilität vorantreiben und die Substitution von Metall verstärken.