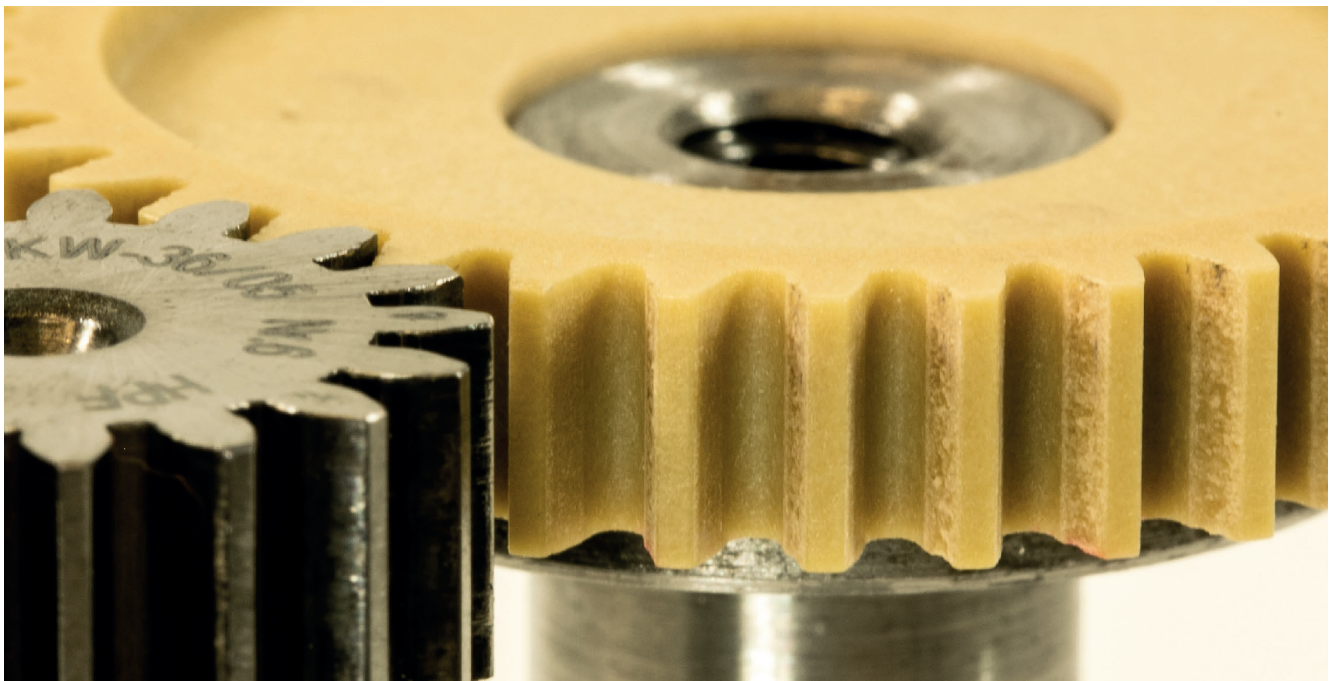


Mikrometergenau auf den Zahn gefühlt

In-situ-Getriebeprüfung für die anwendungsnahe Untersuchung spritzgegossener Kunststoffzahnräder

Bislang musste zur Auslegung von Kunststoffzahnradern die Zahnweite punktuell und manuell vor, während und nach der Getriebeprüfung vermessen werden. Ein neu entwickelter In-situ-Getriebeprüfstand ermöglicht die quasi kontinuierliche Untersuchung von Zahnverformung und Verschleißverhalten bereits während der Getriebeprüfung. Hierdurch reduzieren sich Aufwand und Bedienereinflüsse. Auch kann nicht-lineares Verhalten besser ermittelt werden.



Zahnradverschleiß: Darstellung des Materialabtrags an den Zahnflanken am Beispiel einer Zahnradpaarung gemäß VDI 2736 Baugröße 1 (© LKT)

Kunststoffe werden aufgrund ihrer werkstoffspezifischen Vorteile gegenüber Metallen und der wirtschaftlichen Verarbeitbarkeit im Spritzgussverfahren zunehmend als Zahnradwerkstoff in Getrieben eingesetzt. Die Auslegung von Kunststoffgetrieben erfolgt üblicherweise nach VDI 2736, die sich in drei Schritte gliedert: die thermische, mechanische und tribologische Auslegung. Eine wichtige Auslegungsgröße stellt hierbei die Zahnverformung dar, die sich aus der last-, temperatur- und zeitabhängigen Verformung und dem zugrundeliegenden Ver-

schleiß des Kunststoffzahnrad ergibt.

Beim Verschleiß wird zwischen einer Einlaufphase und stationären Phase unterschieden [1], die sich in Abhängigkeit des Lastkollektivs, z. B. wirkendem Drehmoment oder der Betriebstemperatur, unterschiedlich stark ausbilden. Für die Einlaufphase sind hierbei nicht-lineare Verschleißraten charakteristisch, wohingegen die stationäre Phase durch lineare und zudem vergleichsweise geringere Verschleißraten gekennzeichnet ist [2] (**Bild 1**). Für eine betriebsgerechte Auslegung einer Zahnradpaarung ist dem-

nach die Kenntnis der zeitlichen Zahnverformung und Materialabnahme am Zahnrad in Folge des Verschleißes essentiell.

Grenzen herkömmlicher Verfahren

Die Bestimmung des Verschleißes bei Zahnradpaarungen erfolgt derzeit in der Regel durch eine manuelle Vermessung des diametralen Zweirollenmaßes und der Zahnweite vor und nach der Getriebeprüfung [3, 4]. Hierdurch kann dem temperatur- und zeitabhängigen Werk-

stoffverhalten von Kunststoffen jedoch kaum Rechnung getragen werden, wodurch die Aussagen über den Verschleiß stets fehlerbehaftet sind. Darüber hinaus ist mit nur einer Messung der Zahnweite vor (W_{4B}) und nach (W_{4E}) der Prüfung keine Aussage über die Charakteristika der Einlaufphase und stationären Phase möglich. In **Bild 1** wird dies mit der interpolierten Zahnweitenabnahme zwischen den eingangs und am Ende gemessenen Zahnweiten verdeutlicht.

Abhilfe können gestaffelte Zahnradprüfungen mit Zwischenmessungen des Verschleißes schaffen, die aber entsprechend zeit- und arbeitsintensiv sind und nur eine Annäherung an die reale Zahnweitenabnahme ermöglichen (**Bild 1**). Darüber hinaus verursacht der Aus- und Einbau eine erneute Anpassung der Oberflächen der einzelnen Laufpartner oder erfordert alternativ einen erhöhten Probenumfang, bei dem die Proben mit verschiedenen Lastwechseln geprüft werden.

Zur Umgehung dieser Problematik existieren zwei Ansätze für In-situ-Verschleißmessungen. Zum einen ist dies die akustische Erfassung des Laufgeräusches, das in Kombination mit einem Wegsensor und einer Fourier-Transformation Rückschlüsse auf den Verschleiß eines Zahnradzulasst [5]. Zum anderen ist dies die Berechnung des Verschleißes am Zahn aus der Verdrehung zwischen An- und Abtriebsachse des Prüfstands [6], bei dem der Zahnverschleiß mit der Zahnverformung überlagert ist. Die verfügbaren Systeme sind jedoch aufgrund der niedrigen Auflösung der verwendeten Mess-

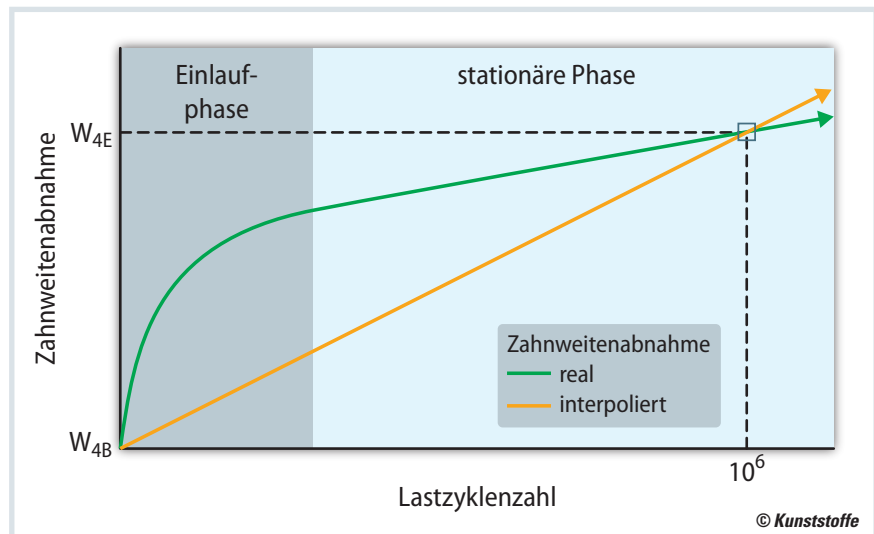


Bild 1. Schematische Darstellung der realen und interpolierten Zahnweitenabnahme während der Einlaufphase und stationären Phase in Anlehnung an [5] (Quelle: LKT)

systeme nur in der Lage, den Verschleiß im Millimeterbereich darzustellen. Bei großen Zahnradern der VDI 2736 Baugröße 2 und größer kann dies ausreichend sein, stellt aber für die grundlagenorientierte Forschung und den Markt der kleinen Zahnradern, z. B. der VDI 2736 Baugröße 1, mit einer erforderlichen Auflösung im Mikrometerbereich keine Option dar.

Hochauflösende In-situ-Getriebeprüfung

Für die bis in den Mikrometerbereich hochauflösende In-situ-Untersuchung von Zahnverformung und Verschleißverhalten von spritzgegossenen Kunststoffzahnradern wurde am Lehrstuhl für Kunststofftechnik an der Friedrich-Ale-

xander-Universität Erlangen-Nürnberg ein neues Prüfkonzept und ein darauf aufbauender neuer Getriebeprüfstand entwickelt (**Bild 2**). Den Kern bilden hierbei anwendungsspezifische Inkrementaldrehwinkelgeber, deren Signal mit einer Abtastrate von 80 MHz aufgezeichnet und ausgewertet wird. Diese Drehwinkelgeber ermöglichen eine Messung des zeitabhängigen Winkelversatzes zwischen der Antriebs- und Abtriebswelle. Die Relation der an- und abtriebsseitigen Lageinformation wird in Kombination mit dem Signal von vorab definierten, aufeinanderfolgenden Einzelzähnen der Kunststoffzahnradern zu einer zeitlichen Systemgröße aufbereitet, die für jede zu prüfende Zahn-Zahn-Paarung individuell ist. »

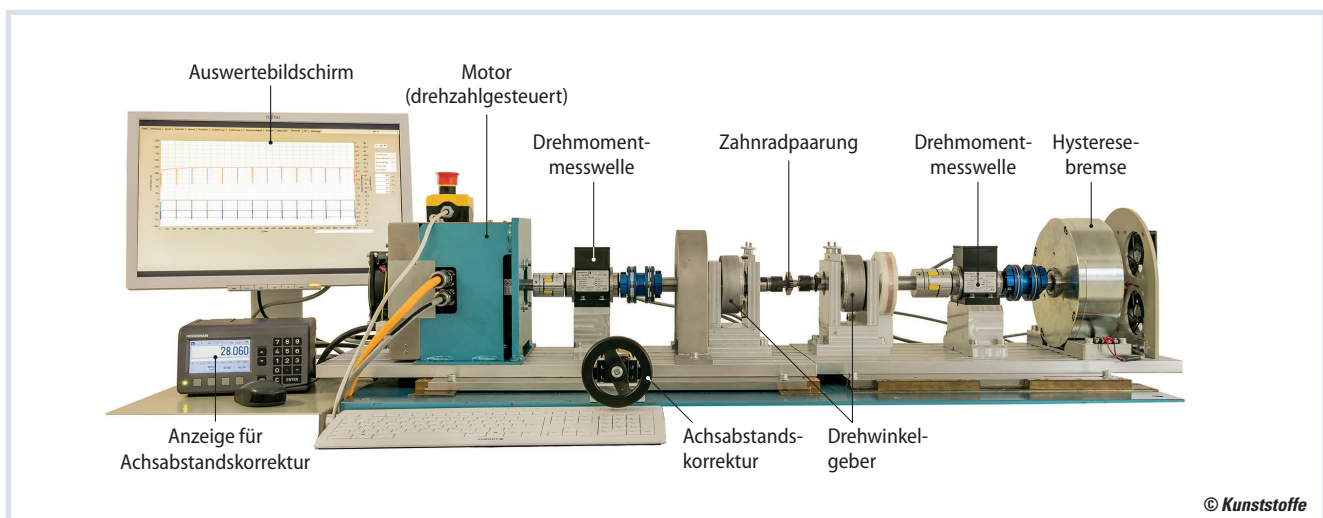


Bild 2. In-situ-Getriebeprüfstand mit Kennzeichnung der Hauptkomponenten (© LKT)

Die Autoren

Dipl.-Ing. Bernhard Gierl ist seit 2014 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Kunststofftechnik (LKT) an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg; gierl@lkt.uni-erlangen.de

Sebastian Hertle, M. Sc., ist seit 2014 wissenschaftlicher Mitarbeiter und seit 2017 Abteilungsleiter für Verbindungstechnik und Tribologie am LKT.

Dipl.-Ing. Tobias Kleffel ist seit 2014 wissenschaftlicher Mitarbeiter und seit 2018 Oberingenieur am LKT.

Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer ist seit 2009 Inhaber des Lehrstuhls für Kunststofftechnik an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Dank

Die Autoren danken der Fördervereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA), der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AIF) sowie der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Förderung im Rahmen der Projekte FVA 725 II (Förderkennzeichen IGF 19269N) und FOR 2271: Prozessorientiertes Toleranzmanagement mit virtuellen Absicherungsmethoden (Förderkennzeichen DR 421/21-1).

Präsentation auf der K2019

Der neue In-situ-Getriebeprüfstand wird erstmals auf der K 2019 vorgestellt:

Halle 12, Stand C45

Service

Literatur & Digitalversion

- Ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/2019-09

English Version

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

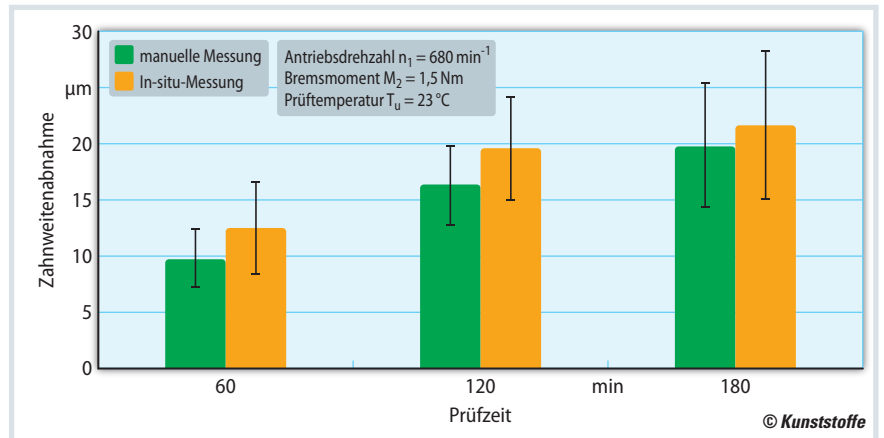


Bild 3. Manuell und in situ gemessene Zahnweitenabnahme im Vergleich (Quelle: LKT)

Die Anzahl an Zahn-Zahn-Paarungen ist dabei auf die Zahnanzahl des antreibenden Ritzels beschränkt, die sich – bedingt durch das Messprinzip – von der des Kunststoffzahnrad unterscheiden muss. Über diese Systemgröße kann ein lastzyklusabhängiger Winkelversatz und somit eine zeitliche Änderung in der Zahnverformung dargestellt werden. Die Messgenauigkeit beträgt unter Berücksichtigung von Störgrößen, z. B. Schwingungen des Motors, bei einem Kunststoffzahnrad mit 39 mm Teilkreisdurchmesser und einer Antriebsdrehzahl von 680 U/min rund 0,5 µm.

Parallel zur Zahnverformung wird das Belastungskollektiv durch Drehmomentmesswellen auf der Antriebs- und Abtriebsseite mit einer Genauigkeit von < 0,1 % des Nenndrehmoments und einer Abtastrate von 5 MHz, einer drehzahlgeordneten Antriebseinheit sowie die Temperatur optional mit einer Thermografiekamera aufgezeichnet.

Aus dem mit einer Abtastrate von 80 MHz aufgezeichneten Winkelversatz kann über die geometrischen Randbedingungen der Zahnradpaarung die Zahnverformung in Abhängigkeit der aufgezeichneten Belastung berechnet werden.

Zur Ermittlung des Verschleißanteils an der Zahnverformung wird zu definierten Zeitpunkten das Bremsmoment auf der Abtriebsseite kurzzeitig gelöst, sodass sich die mechanische Verformung zurückstellen kann. Mit dem hier aufgezeichneten Winkelversatz kann anschließend der Verschleiß am Messkreisdurchmesser, dem Ort des größten auftretenden Verschleißes im Zahneingriff, berechnet werden.

In-situ-Getriebeprüfung vs. manuelle Messung

Für einen Vergleich der In-situ-Getriebeprüfung mit der aufwendigen, bis dato üblichen manuellen Messung wird im Folgenden das Verschleißverhalten eines Kunststoffzahnrad aus Polyamid 66 mit 39 Zähnen in einer anwendungsnahen Kombination mit einem 100Cr6-Stahlritzel mit 17 Zähnen vorgestellt. Bei der In-situ-Getriebeprüfung wurde mit dem beschriebenen Ansatz an drei Probekörpern jeweils die Verschleißentwicklung an 17 Zähnen auf dem neu entwickelten Getriebeprüfstand analysiert. Die Getriebeprüfung für die manuelle Messung erfolgte ebenfalls auf diesem Prüfstand, um konstante Randbedingungen zu gewährleisten.

Für die Ermittlung des Verschleißverhaltens wurde die Zahnweite vor und nach der Getriebeprüfung in Anlehnung an DIN 21733 über jeweils vier Zähne an drei repräsentativen Messstellen bestimmt, um über die Zahnweitenabnahme den Verschleiß zu ermitteln. Hierbei wurden für jeden Messpunkt drei Proben verwendet.

Die Ergebnisse in **Bild 3** zeigen eine gute Übereinstimmung des Verschleißes in Form der Zahnweitenabnahme zwischen beiden Messsystemen. Bei der In-situ-Getriebeprüfung wird in diesen Versuchen ein etwas höherer Verschleiß gemessen. Dieser Unterschied zwischen manueller und In-situ-Messung ist absolut betrachtet annähernd konstant über die Zeit, was auf ein geringes, nicht vermeidbares Restmoment im Leerlauf zurückgeführt werden kann. Die Identifizierung weiterer potentieller Ursachen ist

Gegenstand weiterer Optimierungen im Prüfablauf.

Mit der für die manuelle Auswertung exemplarisch gewählten Laufzeiten von 60, 120 und 180 Minuten kann jedoch keine belastbare Aussage darüber getroffen werden, ob sich die Zahnradpaarung noch in der Einlaufphase oder bereits in der stationären Phase befindet. Dies ist erst möglich, wenn eine höhere Auflösung genutzt wird, was bei der In-situ-Getriebeprüfung im Vergleich zum konventionellen Vorgehen ohne erheblichen Mehraufwand sowie ohne zusätzliche Proben bei jeder Prüfung möglich ist.

Bild 4 zeigt hierzu exemplarisch die Einzelmessung einer In-situ-Getriebeprüfung, bei der nach einer ersten Stützstelle nach drei Minuten der Verschleiß in Abständen von zehn Minuten erfasst wurde. Die Auflösung wurde hierbei so gewählt, dass die Entlastungsstufen zur Verschleißmessung keine relevante Beeinträchtigung des Temperaturhaushalts zur Folge haben. Es ist zu erkennen, dass eine stationäre Phase bei diesem Beispiel nach etwa 80 Minuten erreicht wird.

Fazit

Der neu entwickelte In-situ-Getriebeprüfstand verfügt über deutliche Vorteile gegenüber der bis dato eingesetzten manuellen Messung des Verschleißes. Dazu zählt, dass Bedienereinflüsse entfallen

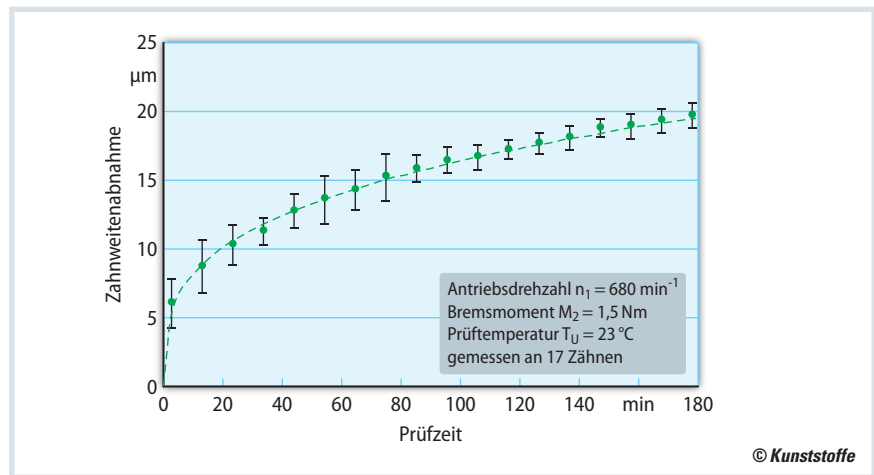


Bild 4. Exemplarische In-situ-Messung der Zahnweitenabnahme über der Prüfzeit (Quelle: LKT)

und der Prüfaufwand signifikant sinkt, was speziell bei der Untersuchung des realen Verschleißes ganz neue Möglichkeiten in Bezug auf die zeitliche Auflösung eröffnet, die bei dem vorgestellten Ansatz vom Probenumfang entkoppelt ist. Des Weiteren lässt sich die Zahnverformung in Abhängigkeit der Belastung ermitteln und durch die Kenntnis des Verschleißes auf die last-, temperatur- und zeitabhängige Verformung schließen.

Der neu entwickelte In-situ-Getriebeprüfstand schafft somit die Möglichkeit, das tribologische Verhalten von Kunststoffen im Vergleich zum Stand der Technik tiefgreifender und anwendungsnäher zu untersuchen. Auf dieser Grundlage las-

sen sich sowohl in der Forschung als auch Anwendung neue Ansätze zur kunststoffspezifisch angepassten Zahnradauslegung und -tolerierung ebenso wie zur weiteren Optimierung der Kunststoffzusammensetzung ableiten. Von zentraler Bedeutung ist hierbei in einem ersten Schritt die Erforschung des temperatur-, zeit- und belastungsabhängigen (statisch und dynamisch) Werkstoffverhaltens in Bezug auf Zahnverformung und Verschleiß. Die Definition hierfür geeigneter Prüfabläufe, die auch das viskoelastische Materialverhalten der Kunststoffe berücksichtigen, ist Gegenstand der aktuellen Forschung am Lehrstuhl für Kunststofftechnik. ■

Wir stellen die **LSR**-Welt auf den **KCP**

- PRODUKTENTWICKLUNG
- LSR-DOSIERSYSTEM
- KALKANAL
- LSR- UND 2K-WERKZEUGE
- TURNKEY ANLAGEN
- TEILEPRODUKTION

ELMET präsentiert auf der K 2019 das neue VOLLELEKTRISCHE WELTKLASSE DOSIERSYSTEM „TOP 5000 E“! www.elmet.com

K 2019
Halle 12
Stand:
12E40-5

ELMET
ELASTOMER IS OUR BUSINESS