

# AUS DER ZEITREIHE ERMITTELT

Lastkollektive können mit verschiedenen Methoden definiert werden. In diesem Beitrag wird die Vorgehensweise zur Erzeugung eines Lastkollektivs aus einer Zeitreihe erläutert. Diese Methode ermöglicht es, wechselnde Lasten aufgrund von Messungen oder Simulation detailliert in die Festigkeitsrechnung einfließen zu lassen und so die Lebensdauer von Getrieben sehr genau vorherzusagen.

» VON DIPL.-ING. JÜRIG LANGHART

**V**eränderliche Belastungen, die aus einem Arbeitsvorgang, Anfahrvorgang oder einem Betrieb nahe einer kritischen Drehzahl resultieren, verursachen stark fluktuierende Kräfte in den Verzahnungen eines Antriebssystems. Höhe und Verteilung dieser Belastungen hängen von der Arbeitsmaschine, dem Motor, den dynamischen massenelastischen Eigenschaften des Systems und anderen Einflüssen ab.

Diese veränderlichen Lasten können durch experimentelle Messung der Betriebslasten an der jeweiligen Maschine oder mittels Simulation bestimmt werden und liegen dann als Zeitreihen vor. Basierend auf diesen Daten können Serviceintervalle aufgrund der Analyse der aufgelaufenen rechnerischen Schädigungen über die Zeit angepasst werden.

Für eine Festigkeits- und Schädigungsanalyse von Maschinenelementen muss in einem ersten Schritt eine Zeitreihe verarbeitet und in ein Verweildauerkollektiv umgewandelt werden, um die Festigkeit eines bestimmten Zahns jedes Zahnrades oder eines Wälzlagers zu ermitteln.

Wenn Drehmoment und Drehzahl in einer Zeitreihe immer positiv sind, erfolgt die Umrechnung solcher Daten in ein Verweildauerkollektiv mit der Zählmethode nach ISO 6336-6, Abschnitt 4.1, oder erweitert mit Einbezug der Drehzahlen. Wenn jedoch Drehmoment und/oder Drehzahl mit positiven und negativen Werten vorhanden sind, wird die Rainflow-Zählung angewandt. Damit wird die signifikante Wirkung von Wechselbiegungen auf den Zahnfuß erfasst. Dazu müssen alle auftretenden Belastungswechsel erfasst und daraus die tatsächliche Wechselbiegebelastung mit dem Wechsel-



Bild: scharfsm86/AdobeStock

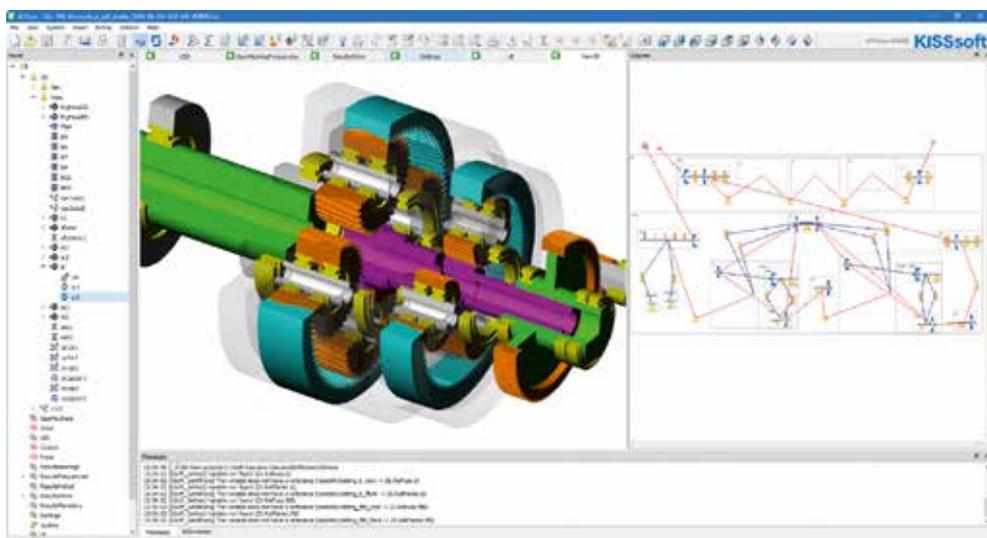
biegefaktor  $Y_M$  bestimmt werden. Dadurch wird für jeden Lastzyklus ein unterschiedlicher Wert für den Mittelspannungseinflussfaktor  $Y_M$  ermittelt.

## Extraktion der Belastung für einen bestimmten Zahn aus einer Zeitreihe

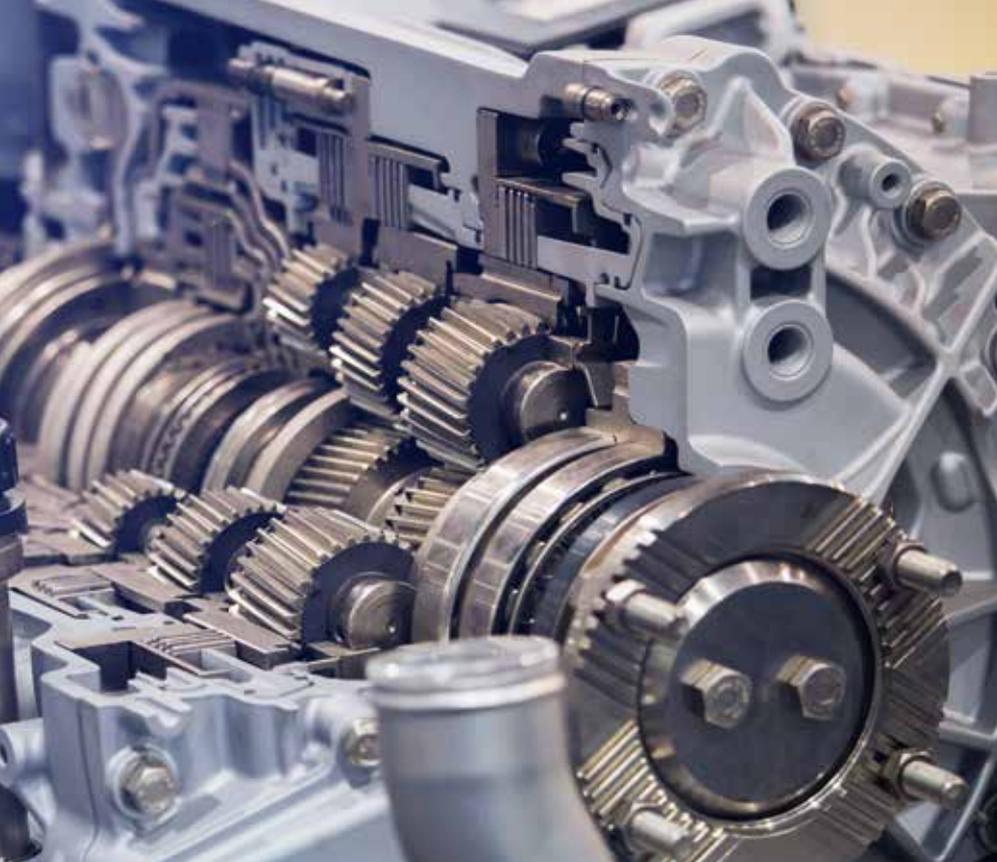
Das Zahnrad erhält, je nach Rotationslage und somit betrachtetem Zahn, eine unterschiedliche Schädigung. Die Resultate sind interessant und die Unterschiede je nach vorliegenden Zeitreihen, beachtlich. Da die Zeitreihen üblicherweise auf einer konstanten Abtastrate basieren, resultiert bei variierender Drehzahl zwangsläufig eine unterschiedliche Anzahl Lastpunkte pro Zahneingriff. Um eine Verfälschung des Resultates zu vermeiden, werden immer zwei Lastpunkte pro Umdrehung Zahneingriff extrahiert. Liegen mehrere unterschiedliche Lastpunkte vor, werden der tiefste und der höchste Wert verwendet. Wenn nur ein Wert abgetastet wurde, wird dieser doppelt gezählt.

## Erzeugen eines Lastkollektivs mit der „Einfachen Zählmethode“

Sind die Vorzeichen von Drehmoment und Drehzahl in einer Zeitreihe nie wechselnd, kann für Zahnräder die sogenannte einfache Zählmethode angewendet werden. Bei dieser Zählung wird eine Matrix mit Drehmoment- und Drehzahlintervallen gebildet und jeder Lastpunkt wird in die entsprechende Kategorie (Bin) eingeordnet und die Anzahl der Lastpunkte gezählt. Diese Zählmethode kann theoretisch auch für Zeitreihen mit wechselnden Drehmomenten/Drehzahlen



Windkraftgetriebe bestehend aus zwei Planetenstufen und einer Stirnradstufe, dargestellt in KISSsoft.



Im Betriebszustand „Stromerzeugung“ bewegt sich der Rotor mit einer üblichen, geringen Drehzahl, wobei das Drehmoment innerhalb des Bereichs von etwa 15 Prozent bis 100 Prozent variiert. Die Lastverteilungsmatrix zeigt einen großen Teil der Belastung bei einer eher tieferen Drehzahl. Insgesamt werden 12.000 Datenpunkte verwendet.

Da die Zeitreihe keine negativen Drehmomente beinhaltet, wird keine Rainflow-Zählung durchgeführt, sondern die einfache Zählung nach ISO 6336, erweitert um die Klassierung der Drehzahlen angewendet. Das Verweildauerkollektiv wird mit der gewünschten Anzahl Drehmomentstufen und mehreren Drehzahlklassen erstellt. Es ist empfehlenswert, eine gewisse Spreizung der Drehmomentstufen vorzunehmen, um damit bei höheren Drehmomenten eine feinere Abstufung zu erhalten. Das erlaubt es, die schädigenden Anteile genauer erfassen zu können.

Für die Anteile der Drehmomente unterhalb der dauerhaft zulässigen Spannung für Fuß und Flanke werden keine Teilschädigungen gerechnet. Deshalb ist es von zentraler Bedeutung, welcher Verlauf der Wöhlerlinie

angewendet werden. Dabei muss man jedoch beachten, dass mit der einfachen Zählmethode die Wechselbiegung nicht erfasst werden kann und somit eine Verfälschung der tatsächlichen Belastung in Kauf genommen wird.

Die einfache Zählmethode ist auch in ISO 6336-6, Tabelle 4 dokumentiert. Um die Verweildauerkollektive erzeugen zu können, wird der Gesamtbereich der extrahierten Lasten in Bins unterteilt und jeder Lastpunkt dem entsprechenden Bin zugeordnet. Somit enthält jeder Bin die Anzahl der Lastpunkte, wie oft der Zahn mit einem Drehmoment in der Drehmomentklasse belastet ist. Eine weit verbreitete Anzahl von Bins - gemäß ISO 6336-6 - ist 64.

### Erzeugung eines Lastkollektivs mit der „Rainflow Zählung“

→ **Zahnfußwechselbiegung:** Wenn Drehmoment und/oder Drehzahl wechselnde Vorzeichen haben und sich somit die belastete Flanke ändert, werden für die Beurteilung der Hertzschen Pressung nur die jeweiligen Belastungsfälle auf dieser Flanke berücksichtigt. Der Zahnfuß ist einer Wechselbelastung ausgesetzt, wobei er bei positivem Drehmoment auf Zug und bei negativem Drehmoment auf Druck beansprucht wird.

Nach ISO 6336-3 werden die negativen Drehmomente mit 1.2 multipliziert, da die Druckspannung auf der unbelasteten Flanke etwa 20 Prozent höher ist als die Zugspannung auf der belasteten Flanke. Der Faktor 1.2 geht auf eine Untersuchung

zurück und kann mit FEM-Berechnungen bestätigt werden.

### → Zählung der Zyklen mithilfe der Rainflow

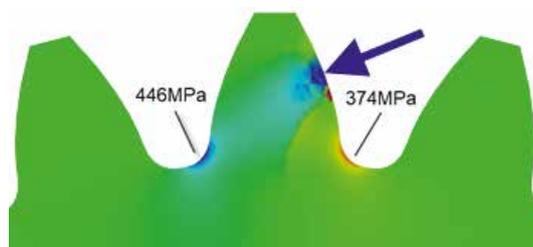
**Methode:** Die Rainflow-Methode nach ISO 12110-2 wird mit Spannungen und nicht mit Drehmomenten durchgeführt. Da jedoch Zahnfußbiegespannung und Drehmoment proportional sind, wird für die Zählung das Drehmoment verwendet.

Die Rainflow-Zählung liefert eine Matrix mit den Drehmomentklassen Thigh zu Tlow. Die Matrix hat daher zwei Drehmoment-Achsen, in der Y-Achse für Thigh und in der X-Achse für Tlow. Die Darstellung als Halbmatrix ist in diesem Fall ausreichend, weil es unerheblich ist, in welche Richtung das Drehmoment ändert.

### Berechnungsbeispiel Windkraftgetriebe

Nachfolgend wird die Analyse eines Windkraftgetriebes, bestehend aus zwei Planetenstufen und einer Stirnradstufe, in KISSsoft gezeigt. Als Betriebszustand wird hier ein typischer Vollastbetrieb simuliert und die Zeitreihen für die anschließende Zahnradberechnung verwendet.

Da Drehmoment und Drehzahl aus der Simulation auf den Rotor bezogen sind, müssen für die Berechnung der zweiten Planetenstufe und der Stirnradstufe für die Drehmomente und Drehzahlen die entsprechenden Übersetzungen miteinbezogen werden.



**Zahnfußspannungen auf der belasteten und unbelasteten Seite mit FEM-Analyse.**

Grafiken: KISSsoft

für die Festigkeitsrechnung gewählt wird. Die Theorie der Schädigungsrechnung hat einen entscheidenden Einfluss auf die Festigkeitsrechnung. In der Norm IEC 64100-4 ist vorgeschrieben, dass die Lebensdauerfaktoren ZNT und YNT gemäß der ISO 6336 gerechnet werden sollen, mit dem Verlauf zu  $0.85$  bei  $10^{10}$  Lastzyklen, was der Empfehlung für die Berechnung für einen „kritischen“ Betrieb entspricht. Die Schädigungshypothese, wie in ISO 6336-6 verwendet, ist die sogenannte Palmgren-Miner Methode. Da die Lebensdauer von Windkraftgetrieben üblicherweise 20 Jahre oder mehr betragen muss, sind – trotz der relativ geringen Drehzahlen – sehr hohe Lastzyklenzahlen vorhanden. **« KF**

**Dipl. Ing. Jürg Langhart** ist Senior Engineer - Global Sales bei KISSsoft.