

1 Einleitung

Einer der wesentlichen Kostentreiber im Maschinenbau ist das eingesetzte Material [COMM13, STAT22]. Zur Kostenreduktion aber auch zur Reduktion des CO₂ Ausstoßes bei mobilen Anwendungen wird zunehmend versucht, die Masse der Komponenten zu verringern [SEEL23]. In der Getriebeentwicklung hat sich die Leistungsdichte als Verhältnis von Getriebegewicht zur übertragbaren Leistung als eines der wesentlichen Qualitätskriterien manifestiert. Das Einsparen von Material führt in der Regel aber auch zu geringeren Steifigkeiten der Komponenten. In Kombination mit höheren spezifischen Leistungen und damit einhergehenden höheren Kräften treten höhere Verformungen und Verlagerungen im Getriebe auf. Das Getriebe und dessen Umfeld ist insgesamt elastischer.

Die Bauform des Planetengetriebes weist aufgrund der Leistungsaufteilung auf mehrere Pfade eine höhere Leistungsdichte auf, als ein einfaches Stirnradgetriebe, und wird daher trotz erhöhter Komplexität vermehrt eingesetzt [MÜLL98]. Zur weiteren Erhöhung der Leistungsdichte kann insbesondere Material in den, im Vergleich zum Volumen niedrig beanspruchten Komponenten, wie dem Planetenträger oder dem Gehäuse reduziert werden. Diese werden an vielen Stellen massiver, als aus Sicht der Tragfähigkeit notwendig, ausgelegt, um höhere Steifigkeiten zu erreichen und so Achslageabweichungen der Verzahnungen zu reduzieren, vgl. **Bild 1**.



Bild 1: Einfluss hoher Leistungsdichten auf das Verformungsverhalten von Planetengetrieben

Influence of High Power Densities on the Deformation Behavior of Planetary Gearboxes

Im Planetenträger ist die vorrangige Verformung die Torsion. Hinzu kommen Verformungen der Trägerwangen, die durch das Kippmoment des Planetenrades verursacht werden. Verformungen der Planetenachse resultieren aus den Zahnkräften. Hierdurch kommt es zu weiteren Achslageabweichungen des Planetenrades und Achsabstandsänderungen, die das Einsatzverhalten des Getriebes beeinflussen [KLOC17].

Aufgrund des großen Durchmessers lässt sich durch eine reduzierte Radkranzstärke des Hohlrades vergleichsweise viel Material einsparen. Resultat dünner Radkränze an Hohlradern sind geringere Eingriffssteifigkeiten und stärkere Verformungen des

Zahneingriffs [SLAN15]. In Planetengetrieben mit hohen Leistungsdichten ist zudem ein Trend zu einer höheren Anzahl an Planeten erkennbar, sodass die einzelnen Eingriffe örtlich näher beieinanderliegen. Verformungen im Bereich eines Eingriffes können sich so insbesondere in Kombination mit flexiblen Hohlrädern auf die benachbarten Eingriffe auswirken, vgl. Bild 1 Mitte.

Weitere elastische Verformungen können aus dem Getriebeumfeld resultieren. Das Umfeld wirkt sich insbesondere auf die Achslage der Zentralwellen Sonne, Hohlrad und Planetenträger aus [NIEM03]. Achslageabweichungen dieser Elemente führen zu über dem Umfang veränderlichen Kontaktbedingungen und damit lokal unterschiedlichen Beanspruchungen der Zahnflanken und zu zusätzlichen Anregungen des Systems [THEL19, FING20].

Insgesamt kommt es also in Getrieben mit hohen Leistungsdichten zu höheren elastischen Verformungen, die sich auf das Einsatzverhalten auswirken und damit in der Auslegung berücksichtigt werden müssen. Bislang wird das Verformungsverhalten in der Getriebeauslegung über Berechnungsmethoden bestimmt und die vorliegenden Abweichungen im Zahnkontakt über Zahnflankenkorrekturen kompensiert [NIEM03]. Das Verformungsverhalten der Getriebesysteme ist dabei lastabhängig [NIEM03]. Die Getriebe in den meisten Anwendungen werden jedoch über der Lebensdauer in veränderliche Betriebspunkten betrieben, sodass die Korrektur nur für einen bestimmten Lastbereich ideal wirksam ist [ISO19a]. Bei geringeren Steifigkeiten und höheren Verformungen wird dieser Lastbereich kleiner und die Verzahnung weist für einen weiten Lastbereich ein suboptimales Einsatzverhalten auf.

Diese Arbeit soll einen Beitrag zur Leistungsdichtesteigerung von Planetengetrieben durch die bessere Kenntnis der Auswirkungen elastischer Verformungen auf das Einsatzverhalten in Form von Beanspruchung und Anregung liefern. Hierzu soll die Kenntnis über die auftretenden Verformungen und deren Einfluss auf das Einsatzverhalten verbessert werden. Ferner ist es das Ziel, die so gewonnen Erkenntnisse in Form einer Zahnkontaktanalyse in der Auslegung nutzbar zu machen, sodass die Auswirkungen bewertet und gezielt Gegenmaßnahmen vorgesehen werden können. Als Gegenmaßnahmen eignen sich die Kompensation der Auswirkungen der Verformungen oder die gezielte Reduktion der Verformung an kritischen Stellen, wie Drehmomentstützen oder der Gehäuseanbindung.

Introduction

One of the main cost drivers in the mechanical engineering sector is the material used [COMM13, STAT22]. In order to reduce costs, but also to reduce CO₂ emissions in mobile applications, increasing efforts are being made to reduce the mass of the components [SEEL23]. In transmission development, power density as the ratio of transmission weight to transmissible power has become one of the key quality criteria. However, saving material usually also leads to lower stiffness of the components. In combination with higher specific powers, higher deformations and displacements occur in the gear unit. The gear unit and its surroundings are more elastic overall.

Due to the distribution of power over several paths, the planetary gear design has a higher power density than a simple cylindrical gearstage and is therefore, increasingly used despite its greater complexity [MÜLL98]. To further increase the power density, material can be reduced in particular in the components that are subjected to low stresses compared with the volume, such as the planet carrier or the housing. These are generally designed to achieve higher stiffnesses and thus reduce axial misalignments of the gears. In the planet carrier, the primary deformation is torsion. In addition, there are deformations of the carrier cheeks caused by the tilting moment of the planet gear. Deformations of the planetary gear shaft result from the tooth forces. This results in further axial misalignments of the planetary gear and changes in the center distance, which influence the operational behavior of the gear system [KLOC17].

Due to the large diameter, a comparatively large amount of material can be saved by reducing the rim thickness of the ring gear. The result of thinner rims on ring gears is lower mesh stiffness and greater deformation of the gear mesh [SLAN15]. In planetary gearboxes with high power densities, there is a trend towards a higher number of planets, so that the individual meshes are closer together locally. Deformations in the area of one mesh can thus affect the neighboring meshes, especially in combination with flexible ring gears. Further elastic deformations can result from the gearbox surroundings [NIEM03]. The surroundings affect in particular the axial alignment of the central shafts sun, ring gear and planet carrier. Axial misalignments of these elements lead to variable contact conditions over the circumference and thus to locally different loads on the tooth flanks and to additional excitations of the system [THEL19, FING20].

Overall, gear units with high power densities are subject to higher elastic deformations, which affect the operational behavior and must therefore be considered in the design. This work is intended to increasing the power density of planetary gears by improving knowledge of the effects of elastic deformations on the operational behavior in the form of load and excitation. For this purpose, the knowledge of the occurring deformations and their influence on the operational behavior is to be improved. Furthermore, the aim is to make the findings in the form of a tooth contact analysis usable in the design, so that the effects can be evaluated and targeted countermeasures can be provided. Suitable countermeasures include compensation for the effects of deformation or targeted reduction of deformation at critical points, like torque arms or housing interfaces.