

1 Einleitung

Die Elektrifizierung des automobilen Antriebsstrangs erfordert Getriebekonzepte, die sowohl an die höheren Nenndrehzahlen elektrischer Maschinen als auch an den im Vergleich zu konventionellen Verbrennungsmotoren geringeren Bedarf an schaltbaren Übersetzungsstufen angepasst sind. Mit dem Wegfall des maskierenden Verbrennungsmotorgeräuschs tritt das Geräuschverhalten des Getriebes stärker in den Vordergrund. Parallel dazu steigt die Bedeutung eines hohen Wirkungsgrads, da die Energieeffizienz direkt die Reichweite von Elektrofahrzeugen beeinflusst. Gleichzeitig sind kompakte und leichte Bauweisen gefordert, um Bauraum- und Gewichtsvorgaben einzuhalten und so die Gesamtfahrzeugperformance zu optimieren. Stufenplanetengetriebe kombinieren eine koaxiale Bauweise mit einer hohen Leistungsdichte und ermöglichen höhere Gesamtübersetzungen als einfache Planetengetriebe.

Fertigungs- und Montageabweichungen an den Lagerstellen des Planetenträgers können zu Verlagerungen der Stufenplanetenwellen oder des Trägers führen. In Verbindung mit der Kinematik entstehen zeitvariante Achslageabweichungen, die das Einsatzverhalten beeinflussen und bei der Verzahnungsauslegung berücksichtigt werden müssen. Zur Auslegung von Verzahnungen werden verbreitet quasistatische Zahnkontaktanalysen eingesetzt. In Kombination mit Fertigungssimulationen ermöglichen FE-basierte Methoden die Berücksichtigung der tatsächlichen Verzahnungsgeometrie. Mit der zunehmenden Integration von Getriebestufen in Gesamtsysteme rückt die Betrachtung von Wechselwirkungen in den Fokus. Dynamische Mehrkörpersimulationen können diese Interaktionen abbilden, verwenden jedoch typischerweise vereinfachte Zahnkontaktmodelle. Zur Optimierung der Kontaktverhältnisse werden Zahnflankenmodifikationen eingesetzt, wobei topologische Modifikationen aufgrund ihrer hohen Gestaltungsfreiheit das größte Potenzial bieten. Eine Methode zur Auslegung dieser Modifikationen unter Einbeziehung dynamischer Verlagerungen existiert bislang nicht.

In dieser Arbeit wird eine Berechnungsmethode für Zahnkontakte entwickelt, die sowohl in der quasistatischen Zahnkontaktanalyse als auch in der dynamischen Mehrkörpersimulation eingesetzt werden kann. Die Methode bildet die Grundlage für die Auslegung der Makrogeometrie von Stufenplanetengetrieben unter Berücksichtigung von Montagerestriktionen. Die Methode zur Zahnkontaktberechnung wird in Form des Kraffelements WZL GEARFORCE6D in die MKS-Software DASSAULT SYSTÈMES SIMPACK integriert. Bei der Auslegung der Zahnflankenmodifikationen werden Achslageabweichungen aus Fertigungs- bzw. Montageabweichungen systematisch berücksichtigt. Die Auslegungsmethoden werden für eine Prüfstandsverzahnung angewendet. Mit den Prüfstandsuntersuchungen wird das Anregungs- und Verlagerungsverhalten von Stufenplanetengetrieben analysiert. Die Zahnkontaktberechnung in der dynamischen Mehrkörpersimulation wird mit einem Abgleich der Kontaktbedingungen in Form von Tragbildern und einem Abgleich der Sonnenwellentrajektorie erfolgreich validiert.

Introduction

The electrification of the automotive powertrain requires transmission concepts adapted both to the higher nominal speeds of electric machines and to the reduced need for shiftable gear ratios compared to conventional internal combustion engines. With the elimination of the masking engine noise, acoustic behavior becomes a more prominent design consideration. At the same time, the importance of high efficiency increases, as energy efficiency directly affects the driving range of electric vehicles. Furthermore, compact and lightweight designs are essential to meet packaging and weight constraints, thereby optimizing overall vehicle performance. Stepped planetary gear stages combine coaxial design with high power density and enable higher overall gear ratios than single-stage planetary gearsets.

Manufacturing and assembly deviations at the planet carrier bearing locations can lead to displacements of the stepped planet shafts or the carrier itself. Combined with the kinematic conditions, this results in time-varying axis misalignments that influence operational behavior and must be considered during gear design. Quasi-static tooth contact analysis is commonly used for gear design. In combination with manufacturing simulations, FE-based methods allow the actual gear geometry to be taken into account. With the increasing integration of gear stages into complete systems, the investigation of system interactions is gaining importance. Dynamic multibody simulations can represent these interactions, but typically use simplified tooth contact models. To optimize contact conditions, flank modifications are applied, with topological modifications offering the greatest potential due to their high design flexibility. However, no method currently exists for designing such modifications while incorporating dynamic misalignments.

In this work, a gear contact calculation method is developed that can be applied both in quasi-static tooth contact analysis and in dynamic multibody simulation. The method forms the basis for the macro-geometry design of compound planetary gearsets under assembly constraints. The gear contact calculation is implemented in the form of the force element *WZL GearForce6D* within the DASSAULT SYSTÈMES SIMPACK multibody simulation software. In the design of tooth flank modifications, axis misalignments resulting from manufacturing and assembly deviations are systematically taken into account. The design methods are applied to a test rig gearset. Test rig measurements are used to analyze the excitation and displacement behavior of stepped planetary gear stages. The gear contact calculation in the dynamic multibody simulation is successfully validated through comparison of the simulated contact conditions with experimental contact patterns and by correlating the simulated sun gear shaft trajectory with measurements.