

1 Einleitung

In der Auslegung von Zahnradgetrieben existieren neben der Mindestforderung nach Betriebssicherheit verschiedene Zielgrößen wie eine geringe Anregung oder ein hoher Wirkungsgrad [KLOC17 S.89]. Dabei hat sich in Bezug auf das Getriebegeräusch einerseits durch Leichtbaukonzepte und andererseits durch die Elektrifizierung des Antriebsstrangs und dem damit einhergehenden Wegfall der maskierenden Geräusche des Verbrennungsmotors die Relevanz der Getriebeanregung erhöht. Damit einhergehend trägt eine reduzierte Verzahnungsanregung wesentlich zur gesamten Produktqualität bei [HOFA15 S.9–10]. Daraus folgend ist eine hohe Entwurfsqualität hinsichtlich des Geräuschverhaltens in einem frühen Auslegungsschritt des Produktentstehungsprozesses anzustreben, da dort die Auswirkungen konstruktiver Änderungen auf die Entwicklungskosten gering sind [SCHU12 S.233]. Der Einsatz von Simulationswerkzeugen in diesen frühen Entwicklungsschritten wird als *Frontloading* bezeichnet. Durch das Frontloading können spätere aufwendige Anpassungen vermieden und dadurch die Entwicklungskosten reduziert werden [ERNS14 S.2].

Die Berücksichtigung des Anregungsverhaltens erfolgt in der Verzahnungsauslegung fast ausschließlich erfahrungsbasiert oder mit Berechnungsmodellen, die auf quasi-statischen Ansätzen beruhen. Für die häufig im Bereich der E-Mobilität eingesetzten zweistufigen Getriebe werden so dynamische Anregungseffekte nicht in den Auslegungsprozess einbezogen. Dynamische Berechnungsmodelle werden in der Auslegung einerseits wegen fehlender validierter Berechnungsmodelle und andererseits wegen der hohen Rechenzeit zur Bestimmung des dynamischen Geräuschverhaltens nicht eingesetzt. Außerdem wird die menschliche Geräuschwahrnehmung nicht als Qualitätsmerkmal einbezogen. Mit den psychoakustischen Metriken existieren zwar Analysen, die auf verschiedene Eigenschaften des Getriebegeräuschs fokussieren. Jedoch ist zur Anwendung in der Auslegung die Überführung in einen zusammengeführten Kennwert wünschenswert. Existierende Kennwerte wie die wahrgenommene Lästigkeit existieren nicht für zweistufige Getriebe.

Daher soll die Arbeit dazu beitragen, dynamische Anregungseffekte und die gehörbezogene Analyse in den Auslegungsprozess von zweistufigen Getrieben zu integrieren. Im Rahmen dieser Arbeit werden entlang der Schallentstehungskette Berechnungsmodelle zum Anregungs- und Geräuschverhalten von zweistufigen Zahnradgetrieben entwickelt und validiert. Darauf aufbauend wird in der gehörbezogenen Analyse des Getriebegeräuschs der Fokus auf die verschiedenen Wahrnehmungsaspekte anhand der psychoakustischen Metriken gelegt und diese in einem Kennwert zur Integration in die Auslegung von zweistufigen Getrieben zusammengefasst. Schließlich wird eine Auslegungsmethode entwickelt, die rechenzeitoptimiert die Auslegung zweistufiger Getriebe unter Berücksichtigung der dynamischen Anregungseffekte und der menschlichen Geräuschwahrnehmung ermöglicht. Damit steht eine validierte Auslegungsmethode zur Verfügung, die die Entwurfsqualität von zweistufigen Getrieben in der Vorentwicklung im Sinne des Frontloadings steigert.

Introduction

In addition to the minimum requirement of sufficient operational load carrying capacity, the design of gearboxes must meet various target values such as low excitation or high efficiency [KLOC17 p.89]. With regard to gear noise, the relevance of gear excitation has increased due to lightweight design concepts on the one hand and the electrification of the drive train and the associated elimination of masking noise from the combustion engine on the other. As a result, reduced gear excitation makes a significant contribution to overall product quality. [HOFA15 p.9-10]. Consequently, a high design quality with regard to noise behavior should be aimed for in an early design step of the product development process, since the effects of design changes on development costs are low there [SCHU12 p.233]. The use of simulation tools in these early development steps is called frontloading. Frontloading can avoid subsequent complex adaptations and thus reduce development costs [ERNS14 p.2].

The consideration of the excitation behavior in the gear design is almost exclusively based on experience or with calculation models that are founded on quasi-static approaches. For two-stage gearboxes frequently used in the field of e-mobility, dynamic excitation effects are thus not included in the design process, which can lead to undesired load and noise increases in later operation. Dynamic calculation models are not used in the design process due to the lack of validated calculation models on the one hand, and on the other hand due to the high computing time required to determine the dynamic noise behavior. Furthermore, human noise perception is not included as a quality characteristic. With the psychoacoustic metrics, analyses do exist that focus on various characteristics of the gear noise. However, for application in design, it would be desirable to convert these metrics into a combined characteristic value. Existing metrics such as perceived annoyance do not exist for two-stage gearboxes.

Therefore, this work shall contribute to the integration of dynamic excitation effects and hearing-related analysis into the design process of two-stage gearboxes. Within the scope of this work, calculation models for the excitation and noise behavior of gearboxes are developed and validated along the noise generation chain. Based on this, the hearing-related analysis of gear noise will focus on the various perceptual aspects using psychoacoustic metrics, and these will be summarized in a characteristic value for integration into the design of two-stage gearboxes. Finally, a design method is developed that allows the design of two-stage gearboxes in a computationally time-optimized manner, taking into account the dynamic excitation effects and human noise perception. Thus, a validated design method is available, which increases the design quality of two-stage gearboxes in an early development step in terms of frontloading.