# 1 Einleitung

Getriebe über- oder untersetzen Bewegungen, übertragen Momente und Kräfte. Unter den gleichförmig übersetzenden Getrieben nehmen Zahnradgetriebe, insbesondere für Mobilanwendungen, eine entscheidende Rolle ein. Es existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Verzahnungsarten, wie z. B. Triebstock-, Evolventen- oder Zykloidenverzahnungen. Aufgrund der standardisierten Herstellbarkeit und Unempfindlichkeit gegenüber Montagetoleranzen weist die Evolventenverzahnung die größte Bedeutung und Verbreitung auf.

Je höher die Stückzahl der zu fertigenden Bauteile, desto mehr rücken die Kosten des Herstellungsprozesses in den Fokus. Insbesondere der Automobilsektor weist im Vergleich mit anderen Industrien einen hohen Bedarf an verzahnten Bauteilen auf. Die Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles (OICA) weist für das Jahr 2017 ein Produktionsvolumen von mehr als 97 Millionen Personen- und Nutzkraftfahrzeugen aus. Bis heute werden leistungsübertragende Zahnräder vorwiegend spanend aus schmelzmetallurgisch hergestellten Werkstoffen gefertigt.

Weniger hoch belastete Automobilverzahnungen, wie z. B. Massenausgleichsräder, Ketten- oder Steuerräder von Verbrennungsmotoren, werden heute bereits zu einem großen Teil im Press- und Sinterverfahren aus pulvermetallurgisch produzierten Werkstoffen hergestellt. Gegenüber der spanenden Fertigung weist die pulvermetallurgische Fertigung in der Großserienfertigung zum einen ein Potenzial zur Kosteneinsparung auf. Zum anderen bietet die pulvermetallurgische Fertigung einen vielversprechenden Ansatz zur Verbesserung des $CO_2$-Fußabdrucks durch einen geringeren Maschinen-, Material- und Energiebedarf in der Fertigung [STRE12].

Im Vergleich zur Festigkeit bei voller Werkstoffdichte weisen gepresste und gesinterte poröse Werkstoffe eine verringerte Festigkeit auf. Die Entwicklungen der letzten Jahre haben gezeigt, dass durch selektive Oberflächenverdichtung die Tragfähigkeit von PM-Bauteilen verbessert und ein zu volldichten Zahnrädern vergleichbares Festigkeitsniveau erzielt werden kann. Zudem bietet das gezielte Einstellen einer lokalen Porosität an PM-Zahnrädern einen vielversprechenden Ansatz zur Verbesserung des Geräuschverhaltens [BREC18]. Aufgrund der in den kommenden Jahren erwarteten Abkehr der Automobilindustrie von Verbrennungskraftmaschinen hin zu elektrifizierten Antrieben für den Individualverkehr, gewinnt die Optimierung des Geräuschverhaltens von Getriebekomponenten eine immer höhere Bedeutung [VDMA18].

Die Kenntnis der lokalen Porosität ist die Voraussetzung zur Beschreibung des Einsatzverhaltens von pulvermetallurgisch hergestellten Bauteilen. Die heute zur Verfügung stehenden Modelle können zur numerischen Berechnung der dichte- und verformungsabhängigen Bauteileigenschaften im Nachverdichtungsprozess herangezogen werden. Aufgrund der benötigten Rechenleistung können die für die anwendungsgerechte Nachverdichtung nötigen Walzkräfte nur unter hohem technischen und wirtschaftlichem Aufwand bestimmt werden. Ebenso bleiben Variantenrechnungen weiter unpraktikabel.

Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag zur Bestimmung der lokalen Prozesskräfte im Nachverdichtungsprozess von PM-Bauteilen sowie den daraus resultierenden Bauteileigenschaften. Die gewonnenen Erkenntnisse können für die Auslegung der Walzmaschinen und Werkzeuge herangezogen werden. Des Weiteren erlaubt die Kenntnis der auf der lokalen Porosität beruhenden zu erwartenden Werkstoffeigenschaften eine verbesserte Auslegung von pulvermetallurgisch hergestellten Bauteilen. Die Kenntnis der lokalen Werkstoffeigenschaften erlaubt es, dass der Auslegungsprozess von PM-Komponenten und den dafür notwendigen Werkzeugen wissensbasiert und nicht mehr erfahrungsbasiert-iterativ erfolgen kann.

# Introduction

Gearboxes overdrive or reduce movements and transmit torques. Gearboxes, especially for mobile applications, play a decisive role among transmissions with a uniform transmission ratio. There is a large number of different types of gear profiles, e.g. rack and pinion, involute, or cycloidal gear profiles. Due to their simple manufacturing process and insensitivity to mounting tolerances, involute gear profiles are the most important and widespread type.

The higher the number of components to be produced, the more the costs of the manufacturing process come into focus. Compared to other industries, the automotive sector in particular has a high demand for gears. The Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles (OICA) states a production volume of more than 97 million passenger and commercial vehicles for 2017. To this day, metal-cutting production has the highest relevance for power transmitting gears.

Lower loaded automotive gears, such as balancer gears or synchronizer gears of internal combustion engines, are already produced from powder metallurgical materials by pressing and sintering to a large extent. On one hand, powder metallurgical (PM) production could offer a cost advantage compared to metal-cutting production. On the other hand, PM production offers a promising approach to improving the carbon footprint by reducing machine, material and energy demands in production [STRE12].

Due to the porosity of the process, pressed and sintered materials have a lower strength than full dense material. Developments in recent years have shown that selective surface densification can improve the load-carrying capacity of PM-components to achieve a level of strength comparable to that of gears produced from conventional steel. In addition, the application-oriented adjustment of the local porosity of PM-gears offers a promising approach to improve noise behaviour. Due to the expected shift of the automotive industry from internal combustion engines to electrified engines in individual transportation in the coming years, the optimisation of the noise behaviour of transmission components is becoming increasingly important [VDMA18].

Knowledge of the local porosity is a premise for describing the operating behaviour of powder-metallurgical produced components. The models available today can be used for numerical calculation of the density-dependent component properties after the densification process. Due to the required computing power, the process forces, required

for application-oriented process design, can only be determined with great technical and economical effort. Likewise, variant calculations remain impractical.

This work contributes to the determination of local process forces in the densification process of PM-components and the resulting component properties. The experience gained can be used for the design of the rolling machines and tools. Furthermore, the knowledge of the material properties to be expected based on the local porosity allows an improved design of powder metallurgically produced components. Knowledge of local material properties allows the design process of PM-components and the necessary tools to be knowledge-based and no longer experience-based and iterative.