

# 1 Einleitung

## *Introduction*

Die zentrale Komponente eines Bearbeitungszentrums ist die Hauptspindel, welche die Antriebsleistung für den Zerspanprozess bereitstellt und das Werkzeug zur Erreichung bester Fertigungsqualitäten mit hoher Präzision führt. Hauptspindeln werden mehrheitlich mit Wälzlagern, insbesondere Spindellagern, gelagert, da diese eine hohe Belastbarkeit und Drehzahleignung sowie niedrige Anschaffungs- und Betriebskosten aufweisen. Die für den Prozess relevanten Eigenschaften einer hohen Steifigkeit und der betriebssicher erreichbaren Maximaldrehzahl werden unmittelbar durch die Wahl der Lagerung beeinflusst und entsprechend ausgelegt. Auf Basis der Lagerauslegung spezifiziert der Spindelhersteller die maximal ertragbaren Belastungen am Werkzeug, wobei die genauen Belastungen in Fräsprozessen häufig nicht bekannt sind.

Die Auslegung erfolgt in der Praxis überwiegend mit den Methoden der quasistatischen Wälzlagerberechnung unter Berücksichtigung der maximalen Pressungen in den Wälzkontakten und der Kugelkinematik. Hierbei bestimmt der sogenannte Kugelvor- und -nachlauf ( $KvKn$ ), der das Vor- beziehungsweise Nacheilen der Kugeln in den Käfigtaschen infolge radial belasteter oder verkippter Spindellager beschreibt, häufig die rechnerisch ertragbare Belastung. Bei einem unzulässigen  $KvKn$  üben die Kugeln erhöhte Belastungen auf den Käfig aus, sodass nach allgemeiner Auffassung ein Käfigschaden wahrscheinlich ist [KANN80]. Beobachtungen aus der Praxis zeigen hingegen, dass die Spindellagerung keinem unmittelbaren oder frühzeitigen Ausfall trotz der Überschreitung des zulässigen  $KvKn$  unterliegen muss [FALK20].

Die rechnerische Analyse von Wälzlagern und insbesondere der Kugelkinematik ist seit den 1960er Jahren noch heute wesentlicher Bestandteil zahlreicher Forschungsaktivitäten. Für die Beschreibung der Kugelkinematik wurden zahlreiche Modelle mit unterschiedlichen Komplexitätsgraden entwickelt und teils umfassend unter rein axialen Lastzuständen validiert [TÜLL99]; [ROSS13]; [GUPT20]. Ein experimenteller Abgleich unter radialer Belastung für spindellagertypische Betriebsparameter unter hohen Drehzahlen ist aufgrund der aufwändigen Beobachtbarkeit der Kugeln nicht bekannt. Daher kann keine Aussage über die Gültigkeit der entwickelten und in der Praxis angewendeten Methoden erfolgen. Ergänzend ist der Einfluss dynamischer Belastungen auf die Ausbildung des  $KvKn$  sowohl experimentell als auch simulativ nicht umfassend erforscht.

Durch eine präzise bekannte Kugelkinematik wird eine verbesserte Auslegung und ein zuverlässiger Einsatz der Spindellagerung unter radialer Belastung ermöglicht. Die Belastungsgrenzen der Spindel können so betriebssicher ausgeschöpft werden, um die Produktivität der gesamten Maschine zu steigern.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher ein erweitertes, experimentell gestütztes Verständnis über die tatsächliche Belastung der Lagerung sowie die Kugelkinematik in statisch und dynamisch radial belasteten Spindellagern im einsatztypischen

Drehzahlbereich. Die Ergebnisse sollen dazu beitragen, die Analyse und Auslegung von Spindellagerungen zu verbessern.

Der Inhalt der vorliegenden Arbeit umfasst die Erarbeitung von Methoden zur experimentelle und simulative Analyse der Belastungen im Spindellager unter statischen und dynamischen Kräften. Hierzu wird ein neu entwickeltes System zur Messung der Kugelbewegung vorgestellt. Das System arbeitet nach dem Prinzip einer Lichtschranke im Durchlichtverfahren und ermöglicht es, die Kugelbewegung in Umfangsrichtung bei Drehzahlen bis zu 30.000 1/min bei einem Lager mit 90 mm Teilkreisdurchmesser bei Öl-Luft-Minimalmengenschmierung zu erfassen. Zur Analyse der Wechselwirkungen zwischen den Kugeln, dem Käfig und dem Führungsbord am Außenring wird ergänzend ein System vorgestellt, mit dem die radiale Bewegung des Käfigs zeitsynchron zu den gemessenen Kugelbewegungen erfasst wird.

Diese Systeme werden um ein Verfahren zur Bestimmung der Druckwinkel- und Presungsverteilung auf Basis der gemessenen Wellenverlagerung ergänzt. Somit liegen für aufbauende Analysen die Belastungen in den Wälzkontakten zeitsynchron zu den gemessenen Kugelbewegungen vor. Die Systeme werden in verschiedene Prüfstände und Hauptspindeln integriert und für umfassende experimentellen Analysen eingesetzt.

Die bekannten Kugelgeschwindigkeiten werden einer neu entwickelten dynamischen Berechnungsmethode gegenübergestellt. Die experimentellen Analysen erfolgen für verschiedene Lagerausprägungen und Einbausituationen unter statischen und dynamischen Belastungen. Es werden sowohl die Ergebnisse von Kurzzeitversuchen zur Ermittlung der generellen Entwicklung des KvKn als auch Langzeitversuche zur Analyse der Wirkung eines hohen KvKn auf die Käfigbelastung aufgeführt. Abschließend werden die erarbeiteten Methoden zur ganzheitlichen Analyse der Lagerbelastung in Fräsprozessen angewendet. Die experimentellen Ergebnisse weisen im Vergleich zu den in der Praxis angewendeten Berechnungsmethoden überwiegend deutlich geringere KvKn-Werte nach. Diese Erkenntnisse bieten das Potenzial, die Begrenzung der spezifizierbaren Spindelbelastung durch den KvKn zu höheren Belastungen zu verschieben und damit die zulässige Leistungsfähigkeit der gesamten Maschine zu steigern.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit wurden in den von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) „Otto von Guericke“ e.V. und dem Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V. (VDW) geförderten Vorhaben der Industrielle Gemeinschaftsforschung (IGF) 18900 N DYNALAST 1 und 21640 N DYNALAST 2 erarbeitet.

# Introduction

## *Einleitung*

The central component of a machining center is the main spindle, which provides the drive power for the cutting process and guides the tool to achieve the best production quality with high precision. Main spindles are mainly supported by rolling bearings, particularly spindle bearings, as these have a high load capacity and speed suitability and low acquisition and operating costs. The process-relevant properties of high rigidity and the maximum speed that can be achieved reliably are directly influenced by the choice of bearing and designed accordingly. Based on the bearing design, the spindle manufacturer specifies the maximum tolerable loads on the tool, whereby the exact loads in milling processes are often not known.

In practice, the design is mainly carried out using the methods of quasi-static rolling bearing calculation, taking into account the maximum pressures in the rolling contacts and the ball kinematics. The so-called ball advance and retardation, which describes the advance or retardation of the balls in the cage pockets as a result of radially loaded or tilted spindle bearings, frequently limits the calculated load that the system can support. In the case of a high ball advance and retardation, the balls exert increased loads on the cage, so that, according to general opinion, cage damage is probable [KANN80]. Observations from practice, on the other hand, show that the spindle bearing arrangement need not be subject to immediate or premature failure despite the permissible ball advance and retardation being exceeded [FALK20].

The computational analysis of rolling bearings and, in particular, ball kinematics has been an essential part of numerous research activities since the 1960s and is still the subject of current works. For the description of ball kinematics, numerous models with different degrees of complexity have been developed and, in part, comprehensively validated under purely axial load conditions [TÜLL99]; [ROSS13]; [GUPT20]. An experimental adjustment under radial load for spindle bearing typical operating parameters under high speeds is not known due to the complex observability of the balls. Therefore, no statement can be made about the validity of the methods developed and applied in practice. In addition, the influence of dynamic loads on the formation of the ball advance and retardation has not been extensively investigated, either experimentally or by simulation.

Precisely known ball kinematics will enable improved design and reliable use of spindle bearings under radial loads. The load limits of the spindle can thus be exploited reliably to increase the productivity of the entire machine.

The aim of the present work is therefore to obtain an extended, experimentally supported understanding of the actual load on the bearing arrangement as well as the ball kinematics in statically and dynamically radially loaded spindle bearings in the rotational speed range typical for the application. The results should help to improve the analysis and design of spindle bearings.

The content of the present work includes the elaboration of methods for the experimental and simulative analysis of the loads in the spindle bearing under static and dynamic forces. For this purpose, a newly developed system for measuring the ball motion is presented. The system works on the principle of a light barrier in the transmitted light method and makes it possible to record the ball movement in the circumferential direction at speeds of up to 30,000 rpm for a bearing with a pitch circle diameter of 90 mm with oil-air minimum quantity lubrication. To analyze the interactions between the balls, the cage and the guide rib on the outer ring, a system is also presented that measures the radial motion of the cage synchronously with the measured ball motions.

These systems are supplemented by a method for determining the contact angle and pressure distribution based on the measured shaft displacement. This means that the loads in the rolling contacts are time-synchronous with the measured ball motions for subsequent analyses. The systems are integrated into various test rigs and main spindles and are used for comprehensive experimental analyses.

The known ball speeds are compared with a newly developed dynamic calculation method. The experimental analyses are carried out for different bearing designs and installation situations under static and dynamic loads. The results of short-term tests to determine the general development of the ball advance and retardation as well as long-term tests to analyze the effect of a high ball advance and retardation on the cage load are presented. Finally, the developed methods are applied to the holistic analysis of bearing loads in milling processes. The experimental results predominantly show significantly lower ball advance and retardation values compared to the calculation methods used in practice. These findings offer the potential to shift the limitation of the specifiable spindle load by the ball advance and retardation to higher loads and thus increase the permissible performance of the entire machine.

The results of the present work were developed in the Industrial Collective Research (IGF) projects 18900 N DYNALAST 1 and 21640 N DYNALAST 2 funded by the German Federation of Industrial Research Associations (AiF) "Otto von Guericke" e.V. and the German Machine Tool Builder's Association (VDW).