

# 1 Einleitung

## *Introduction*

Die topographischen, metallographischen und chemischen Eigenschaften der Randzone und Oberfläche gefertigter Werkstücke können unter dem Sammelbegriff der Oberflächenintegrität (engl. Surface Integrity, kurz SI) zusammengefasst werden. Dieser beschreibt den „inhärenten oder verbesserten Zustand“ [FIEL64] einer Oberfläche und wird somit von der Halbzeugherstellung und den applizierten Fertigungsprozessen selbst bestimmt oder modifiziert. Zu den wichtigsten Eigenschaften der Surface Integrity zählen neben Charakteristika der Maßhaltigkeit insbesondere der Eigenspannungszustand, die Gefügeausbildung und Korngröße der Werkstückrandzone. [JAVI08; JAWA11; LA M21a; LIAO21]

Die Funktionseigenschaften gefertigter Bauteile werden maßgeblich durch den Randzonenzustand bestimmt. Ungünstige Ausprägungen (bspw. Oberflächendefekte, Kornverformungen oder Risse) können die Lebensdauer der Werkstücke drastisch herabsetzen. Gleichzeitig bedingen u.a. prozessinduzierte Druckeigenspannungen in biegewechselbelasteten Werkstückbereichen eine Steigerung der Lebensdauer. Hieraus folgt die Notwendigkeit, Randzoneneigenschaften in der industriellen Fertigung zielgerichtet einzustellen. [AIGN19; COX19; HARD14; HERB14]

Wenngleich zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen in den vergangenen Jahrzehnten zuerst empirische Korrelationen und dann physikalische Ursache-Wirk-Zusammenhänge zwischen Prozesseingangs- und -störgrößen und erzeugten Randzonenzuständen erarbeiteten, sind diese bisher nur eingeschränkt auf die industrielle Fertigung übertragbar. Komplexität und Variantenvielfalt der Prozesse, Werk- und Schneidstoffe als auch eingesetzten Parameter beschränken die Übertragbarkeit wissenschaftlich erarbeiteter Erklärungsmodelle. Gleichzeitig sind die häufig notwendige Expertise im Umgang mit Modellierungsmethoden, wie bspw. komplexer Finite-Elemente-Modelle (FEM) oder die hierfür erforderliche Berechnungskapazität industriell nicht vorhanden. Aus diesem Grund werden Fertigungsprozesse, insbesondere von sicherheitskritischen Werkstücken, mithilfe aufwändiger empirischer Versuche ausgelegt.

Die Fertigung sicherheitskritischer Bauteile erfordert selbst bei einmal ausgelegten Prozessen eine kontinuierliche Qualitätskontrolle. Diese ist in Bezug auf Randzoneneigenschaften in der Regel nur mittels zerstörender Prüfung möglich und somit mit hohem Kosten- und Zeitaufwand verbunden. Gleichzeitig können mit fortschreitender Digitalisierung zunehmend Daten mithilfe einfacher Sensorik oder direkt aus der Werkzeugmaschine erfasst und zur Prozessanalyse genutzt werden. Während auf diese Weise gravierende Prozessstörungen wie Werkzeugbrüche mit vergleichbar geringem Aufwand detektiert und Gegenmaßnahmen eingeleitet werden können, ist die maschinennahe Vorhersage von Bauteilrandzonenzuständen noch nicht möglich. Einerseits weisen vorhandene Randzonenmodelle nur eine eingeschränkte Gültigkeit für

industrielle Prozesse auf. Andererseits basieren sie in der Regel nicht auf im Realprozess gemessenen Zustandsgrößen und sind aufgrund ihrer Komplexität und erforderlichen Rechenzeit, wenn überhaupt, nur zur Prozessauslegung geeignet. Vorhandene schnellrechnende Modelle, welche eine Korrelation von Prozesszuständen und Randzoneneigenschaften erlauben, sind nach dem aktuellen Stand der Technik noch nicht verfügbar oder basieren lediglich auf empirischen Korrelationen ohne Kenntnis realer physikalischer Wirkzusammenhänge.

Das Ziel dieser Arbeit ist daher die analytische Vorhersage relevanter Randzonenmodifikationen unter Berücksichtigung des prozessinduzierten thermo-mechanischen Lastkollektivs. Zu diesem Zweck soll zuerst ein innovativer Prüfstand entwickelt werden, der mithilfe hochauflösender Doppelbilder des Zerspanprozesses eine Berechnung von Bewegungen und Deformationen in der Scherzone ermöglicht. Auf diese Weise ist einerseits die exakte Bewegung einzelner Werkstoffpartikel durch die Scherzone nachvollziehbar, andererseits eine Analyse der prozessinduzierten Dehnraten und akkumulierten Dehnungen entlang einzelner Bewegungslinien möglich. Dem angeschlossen folgt die Entwicklung und Kalibrierung eines schnellrechnenden Temperaturmodells auf Basis der gemessenen Zerspankraft und vorab bekannter Prozessparameter. Die modellierten Temperaturfelder werden dabei anhand numerischer Spannbildungssimulationen validiert. Im letzten Schritt der Arbeit erfolgt die Verbindung thermischer und mechanischer Belastungen zur analytischen Vorhersage der dynamischen Rekristallisation und somit der Tiefe sich ausbildender Weißer Schichten, sog. White Layer. Physikalisch wird hierfür der Ansatz der freien Helmholtz-Energie genutzt, welcher den thermodynamischen Zustand eines Systems beschreibt. Initiationsbedingungen der Rekristallisation sind dabei sowohl eine negative lokale Änderung des Helmholtz-Potenzials als auch das Überschreiten einer kritischen Temperatur und gespeicherten mechanischen Energie. Eine abschließende Validierung mithilfe von Spannbildungssimulationen und angefertigten Gefügeschliffen soll die Leistungsfähigkeit des Ansatzes zeigen.

## Introduction

The topographical, metallurgical and chemical properties of the rim zone and surface of manufactured workpieces can be summarized under the collective term surface integrity (SI). This describes the "inherent or improved condition" [FIEL64] of a surface and is thus determined or modified by the semi-finished product production and the applied manufacturing processes themselves. The most important properties of surface integrity include characteristics of dimensional accuracy, particularly the residual stress state, the microstructure and grain size of the workpiece rim zone. [JAVI08; JAWA11; LA M21b; LIAO21]

The functional properties of manufactured components are largely determined by the rim zone condition. Unfavourable characteristics (e.g. surface defects, grain deformations or cracks) can drastically reduce the service life of the workpieces. At the same time, process-induced residual compressive stresses in areas of the workpiece subject to alternating bending loads can increase the service life. This results in the need to adjust rim zone properties in industrial production in a targeted manner. [AIGN19; COX19; HARD14; HERB14]

Although numerous scientific studies over the past decades have first developed empirical correlations and then physical cause-and-effect relationships between process input and disturbance variables and generated rim zone states, these have so far only been transferable to industrial production to a limited extent. The complexity and variety of processes, workpiece and cutting materials as well as the parameters used limit the transferability of scientifically developed explanatory models. At the same time, the often necessary expertise in dealing with modeling methods such as complex finite element models (FEM) or the necessary calculation capacity is not available in industry. For this reason, manufacturing processes, especially for safety-critical workpieces, are designed with the help of complex empirical tests.

The production of safety-critical components requires continuous monitoring, even with processes that have already been set up. Regarding rim zone properties, this is generally only possible by means of destructive testing and is therefore very costly and time-consuming. At the same time, as digitalization progresses, data can increasingly be recorded using simple sensor technology or directly from the machine tool and used for process analysis. While serious process faults such as tool breakages can be detected in this way with comparatively little effort and countermeasures can be initiated, it is not yet possible to predict component rim zone conditions close to the machine. On the one hand, existing rim zone models only have limited validity for industrial processes. On the other hand, they are generally not based on state variables measured in the real process and are only suitable for process design, if at all, due to their complexity and the computing time required. Existing, fast-calculating models, which allow a correlation of process states and rim zone properties, are not yet available according to the current state of the art or are only based on empirical correlations without knowledge of real physical interactions.

The aim of this work is therefore the analytical prediction of relevant rim zone modifications, considering the process-induced thermo-mechanical load spectrum. For this purpose, an innovative test rig will first be developed that enables the calculation of movements and deformations in the shear zone with the help of high-resolution double images of the cutting process. In this way, the exact movement of individual material particles through the shear zone can be tracked and the process-induced strain rates and accumulated strains along individual lines of movement can be analysed. This is followed by the development and calibration of a fast-calculating temperature model based on the measured cutting force and previously known process parameters. The modelled temperature fields are validated using numerical chip formation simulations. In the last step of the work, thermal and mechanical loads are combined to analytically predict the dynamic recrystallization and thus the depth of white layer formation. Physically, the Helmholtz free energy approach (also Helmholtz potential) is used, which describes the thermodynamic state of a system. The initiation conditions for recrystallization are a negative local change in the Helmholtz potential, as well as the exceeding of a critical temperature and stored mechanical energy. A final validation with the aid of chip formation simulations and micrographs will demonstrate the performance of the approach.