

# 1 Introduction

Since the technologization of manufacturing processes in the second industrial revolution, it is possible to process metallic materials industrially in large quantities, which created the basis for economic success. A sustainable economic success in manufacturing requires an efficient design of the processes and systems. In cutting, the process design was focus of scientific work since the pioneering work of F. W. TAYLOR, who determined economic process conditions in cutting processes [TAYL06]. Due to technical limitations, these studies were restricted to empirical investigations. Within the third industrial revolution and the availability of computer-aided methods, a further significant development in the technological research was achieved [MERC98]. In the field of cutting technologies, the evolution of scientific progress can be divided in two phases, which are closely linked to the available computational power at that time. At the beginning of the third industrial revolution, the cutting process was scientifically studied by analytical models. With increasing computational performance in the 1970s, analytical models were complemented by simulation models. The synergistic combination of the empirical, analytical, and numerical modeling approaches led to a rapid development of the modeling capabilities, which exceeded the capabilities of the individual methods [MERC98]. This development enabled coping with increasing product variety and shorter development times. In the course of new requirements for cyber-physical systems within production engineering with continuous, intelligent networking of the virtuality with the physical world [BREC17], these synergetic models cannot fulfill the requirements set by Industry 4.0.

In this context, the need for a digital representation – called digital twin – of the manufacturing process in the process design arises for cutting processes with a geometrically defined cutting edge [BERG21]. By use of a digital twin, the process development times and product introduction times that are required in the global competition can be reduced [FILI08]. For other manufacturing processes, the potentials of the digital process design and development by use of modeling techniques was already verified. For example, by using computer- and simulation-based methods, the development time of a new nickel-based alloy was reduced by 67 % [FINK10] and the process design time of a casting process at FORD MOTOR COMPANY was decreased by 15–20 % [ALLI13]. These potentials remain untapped for the field of cutting technologies, where the process design is still characterized by heuristic methods [OUTE20]. In this context, cutting simulations that base on the Finite Element Method (FEM) are gaining more importance [ASTA11]. Compared to purely empirical investigations, the use of FE-simulations offers the possibility to calculate process quantities spatially resolved, such as stresses, strains, or temperature fields. In experimental cutting examinations, these quantities are only measurable to a limited extend [ASTA19, ABUK06, DAVI08]. Nonetheless, they have a crucial importance to improve the process understanding. Regardless of its economic and technical importance [VDW21], the cutting process is one of the least understood manufacturing processes [DAVI14]. Despite the use of chip formation simulations for almost 50 years [KLAM73], knowledge deficits are still persisting in this area, which cause the

necessary transition of simulation methods from research to industry to stagnate [BYRN16]. To overcome the deficits, research activities in the field of modeling the cutting process were intensified within the last 20 years, especially by the STC working group of the INTERNATIONAL ACADEMY OF PRODUCTION ENGINEERING (CIRP) [ARRA13].

To be able to use the FEM for simulations of the cutting process, various input information are required, such as a material and a friction model as well as thermal models [ASTA11, ARRA13]. Especially the material model is of central importance, because it describes the thermo-mechanical reaction of the material [ÖZEL11], which directly influences the simulation results. As a consequence, the material model significantly determines the results of chip formation simulations and can influence models that depend on the simulated results, such as wear models and models of the surface integrity. However, material models for simulations of the cutting process are determined in industry only for difficult-to-cut materials or safety-critical applications. For this purpose, elaborated material tests are used, in which the thermo-mechanical loads are lower than those of the cutting process [CHAN05, GUO03]. Therefore, modeling the material behavior in the cutting process requires extrapolation, which causes uncertainties. The establishment of FE-simulations – especially in an industrial context – requires the closure of existing knowledge gaps regarding the modeling of the material behavior in the cutting process.

Consequently, the present work pursues the objective to contribute to the modeling of the material behavior under metal cutting conditions by means of numerical simulation methods. For this purpose, the influence of the microstructure and its constituents on the material response is experimentally analyzed over a wide range of occurring loads. In addition, the friction behavior between the tool and the workpiece, as a central input information for numerical chip formation simulations, is investigated by means of empirical methods. Based on the experimental results, a new constitutive material and friction model are developed, which are implemented into an FE-chip formation simulation. To model the material behavior under cutting conditions, a methodology for the inverse determination of material model parameters that bases on optimization algorithms is developed and applied to the experimental results. In a case study, the quality of the derived models is validated by simulations of an industrial cutting process, wherefore the potentials for the digital tool and process design are highlighted.

## Einleitung

Seit der Technisierung von Fertigungsprozessen in der zweiten industriellen Revolution können metallische Werkstoffe in großen Mengen verarbeitet werden, wodurch die Basis ökonomischen Wachstums geschaffen wurde. Ein nachhaltiger wirtschaftlicher Erfolg in der Fertigung bedingt eine effiziente Gestaltung der eingesetzten Fertigungsverfahren und -systeme. Im Bereich der Zerspanung ist die Prozessauslegung spätestens seit den wegweisenden Arbeiten von F. W. TAYLOR zur Ermittlung wirtschaftlicher Prozessbedingungen im Fokus wissenschaftlicher Arbeiten [TAYL06]. Durch technische Limitierungen beschränkten sich diese Arbeiten auf rein empirische Untersuchungsmethoden. Mit der dritten industriellen Revolution und der Verfügbarkeit von computergestützten Methoden ging ein weiterer signifikanter Aufschwung einher [MERC98]. Im Bereich der Zerspantechnologie kann die Evolution wissenschaftlichen Fortschritts in zwei Phasen unterteilt werden, welche eng an die verfügbaren Rechenleistungen geknüpft sind. Zu Beginn der dritten industriellen Revolution wurde der Zerspanprozess durch analytische Modelle wissenschaftlich untersucht. Mit steigender Leistungsfähigkeit von Computern in den 1970ern wurde die analytische Prozessbeschreibung durch die rechnergestützte Modellierung komplementiert. Die synergetische Kombination der empirischen, analytischen und numerischen Modellierungsansätze führte zu einer rasanten Entwicklung der Modellierungsfähigkeit, welche weit über die Möglichkeiten der einzelnen Methoden hinausgeht [MERC98]. Diese Entwicklung ermöglichte die Bewältigung steigender Produktvielfalt und verkürzter Entwicklungszeiten. Im Zuge neuer Anforderungen an cyber-physische Systeme mit einer durchgängigen, intelligenten Vernetzung der virtuellen mit der physikalischen Welt innerhalb der Produktionstechnik [BREC17], können die synergetischen Zerspanmodelle die durch die Industrie 4.0 gestellten Anforderungen nicht erfüllen.

In diesem Kontext ergibt sich für die Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide der Bedarf nach einer digitalen Repräsentation des Fertigungsprozesses in der Prozessauslegung, dem digitalen Zwilling [BERG21], durch den die im globalen Wettbewerb erforderlichen Prozessentwicklungs- und Produkteinführungszeiten weiter verkürzt werden können [FIL108]. Die Potenziale der digitalen Repräsentation durch Einsatz von Modellierungstechniken konnten in der Prozessauslegung und -entwicklung bereits für andere Fertigungsverfahren herausgestellt werden. So konnte durch computer- und simulationsgestützte Methoden die Entwicklungszeit einer neuen Nickelbasislegierung um 67 % [FINK10] und die Prozessauslegungszeit eines Gussprozesses bei der FORD MOTOR COMPANY um 15–20 % reduziert werden [ALL113]. Diese Potenziale bleiben für die Zerspanung, bei der die Prozessauslegung überwiegend mittels heuristischer Methoden erfolgt [OUTE20], noch weitestgehend ungenutzt. In diesem Zusammenhang gewinnen Zerspansimulationen auf Basis der Finiten Elemente Methode (FEM) immer mehr an Bedeutung [ASTA11]. Im Vergleich zu rein empirischen Untersuchungen bietet der Einsatz von FE-Simulationen die Möglichkeit, Prozessgrößen wie Spannungen, Dehnungen oder Temperaturen

ortsaufgelöst zu berechnen. Diese Größen sind bei experimentellen Zerspanversuchen nur im begrenzten Maße messbar [ASTA19, ABUK06, DAVI08], haben aber eine entscheidende Bedeutung für ein verbessertes Prozessverständnis. Ungeachtet der wirtschaftlichen und technischen Bedeutung [VDW21], ist der Zerspanprozess eines der am wenigsten durchdrungenen Fertigungsverfahren [DAVI14]. Obwohl Spanbildungssimulationen seit fast 50 Jahren [KLAM73] verwendet werden, bestehen hier weiterhin Wissensdefizite, durch die der notwendige Umbruch von der Forschung in die Industrie stagniert [BYRN16]. Zur Überwindung der Defizite wurden in den letzten 20 Jahren die Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Modellierung des Zerspanprozesses intensiviert, nicht zuletzt auch durch die Arbeitsgruppe STC der INTERNATIONALEN AKADEMIE FÜR PRODUKTIONSTECHNIK (CIRP) [ARRA13].

Um die FEM zur Simulation des Zerspanprozesses nutzen zu können, sind verschiedene Eingangsinformationen erforderlich, wie z. B. ein Material- und Reibmodell sowie thermische Modelle [ASTA11, ARRA13]. Insbesondere das Materialmodell hat eine zentrale Bedeutung, da hierdurch die thermo-mechanischen Wirkzusammenhänge des Werkstoffverhaltens beschrieben werden [ÖZEL11], wodurch das Simulationsergebnis unmittelbar beeinflusst wird. Als Folge dessen bestimmt das Materialmodell in Spanbildungssimulationen das Ergebnis maßgeblich und kann davon abhängige Modelle beeinflussen, wie z. B. Verschleiß- und Randzonenmodelle. Allerdings werden Materialmodelle für die Simulation des Zerspanprozesses industriell nur für schwer zerspanbare Werkstoffe oder sicherheitskritische Anwendungen ermittelt. Hierzu werden weitestgehend aufwendige Werkstofftests durchgeführt, bei denen das Belastungskollektiv niedriger als das des Zerspanprozesses ist [CHAN05, GUO03]. Zur Modellierung des Werkstoffverhaltens im Zerspanprozess ist daher eine Extrapolation erforderlich, welche Unsicherheiten birgt. Die Etablierung von FE-Simulationen – insbesondere auch im industriellen Umfeld – bedarf daher der Schließung der vorliegenden Wissenslücken hinsichtlich der Modellierung des Werkstoffverhaltens in der Zerspannung.

Die vorliegende Arbeit verfolgt daher das Ziel, einen Beitrag zur Modellierung des Werkstoffverhaltens in der Zerspannung mittels numerischer Simulationsmethoden zu leisten. Hierzu wird zunächst der Einfluss der Gefügebestandteile und -struktur auf die Werkstoffreaktion in einem breiten Beanspruchungsbereich experimentell analysiert. Zudem wird das Reibverhalten zwischen Werkzeug und Werkstück als eine zentrale Eingangsinformation für die numerische Spanbildungssimulation empirisch untersucht. Auf Basis der experimentellen Ergebnisse wird ein neues konstitutives Material- sowie ein Reibmodell entwickelt, welches in eine FE-Spanbildungssimulation implementiert wird. Um das Werkstoffverhalten unter Zerspanbedingungen zu modellieren, wird eine auf Optimierungsalgorithmen basierende Methodik zur inversen Ermittlung von Materialmodellparametern entwickelt und auf die experimentellen Versuchsergebnisse angewendet. Die Güte der entwickelten Modelle wird anhand eines industriellen Zerspanprozesses in einer Fallstudie validiert, um so den Mehrwert für die digitale Werkzeug- und Prozessauslegung herauszustellen.