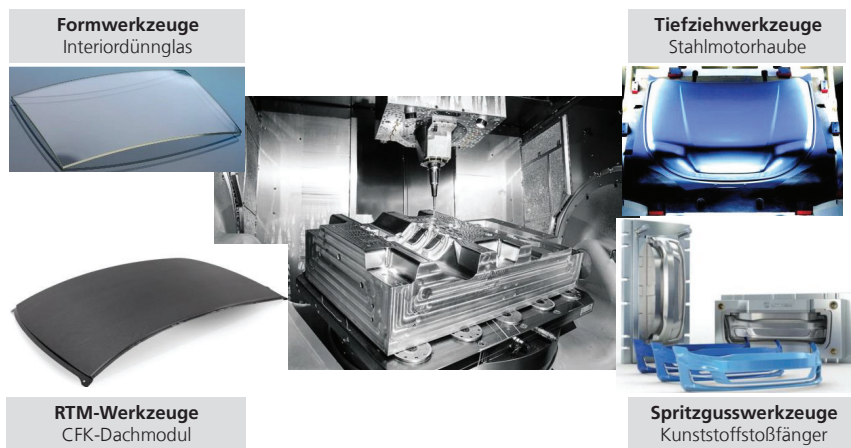


# 1 Einleitung

## Introduction

Schleifen ist ein Feinbearbeitungsverfahren zur Endbearbeitung von Bauteilen. Der Prozess wird im Anschluss an vorgeschaltete, formgebende Fertigungsverfahren (z. B. Fräsen oder Erodieren) ausgeführt [TIMM90]. Eine der Kernbranchen des Schleifens ist der Werkzeug- und Formenbau. Die Branche stellt einen der wichtigsten Wirtschaftszweige in Deutschland dar. Nach Berechnungen des Verbands Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer VDMA wurden im Jahr 2018 Präzisionswerkzeuge mit einem Produktionswert von circa 11,5 Mrd. Euro bei einem Umsatzwachstum von ungefähr 8% zum Vorjahr hergestellt. Hiervon entfallen circa 50% auf den Werkzeugbau, wobei Hohlformwerkzeuge für Ur- oder Umformverfahren Haupterzeugnisse sind. Anwendungsfelder der Branche sind in **Abbildung 1-1** dargestellt. [ALFR20; BOOS17]



**Abbildung 1-1: Anwendungsfelder von Werkzeugstählen [BÖHL16; DEUT14]**

*Application fields of tool steels*

Der Werkzeug- und Formenbau sieht sich einem globalisierten Markt ausgesetzt, der zum einen ein zunehmendes Wachstum verzeichnet und zum anderen kürzere Lieferzeiten bei steigender Form- und Oberflächenqualität verlangt. Daraus resultiert ein steigender Aufwand in der Fertigung der Werkzeuge bei einer international konkurrierenden Lohn- und Fertigungskostensituation. [BOOS17]

Zusätzlich zum bereits bestehenden internationalen Wettbewerb, sehen sich die Unternehmen neuen Herausforderungen in der Produktion konfrontiert. So sind Themen wie Ressourceneffizienz sowie eine umweltschonende, individualisierte Produktion längst fester Bestandteil strategischer Planungen. Diese Maßnahmen dienen mitunter zur Eindämmung der globalen Auswirkungen des Klimawandels. Eine Resilienz der Unternehmen als ein durch die Corona-Pandemie verstärkter Trend und eine damit einhergehende flexiblere sowie autarkere Produktion befeuern darüber hinaus den technologischen Wandel hin zu effizienteren Lieferketten. EU-Regularien in Form von Zertifikaten zur Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks sind ein wesentlicher, treibender Faktor für einen industriellen Wandel zu einer Industrielandschaft, welche Ökologie und Ökonomie effizient vereint. [BERG20]

Folglich besteht ein signifikanter Kostendruck auf die Industrie, welchem durch eine weitere Technologisierung (z. B. durch Automatisierung) begegnet werden kann. In der Branche des Werkzeug- und Formenbaus ist in der gesamten Prozesskette zur Herstellung von Formwerkzeugen die Feinbearbeitung der einzige bis dato zumeist nicht automatisierte Fertigungsschritt. So werden heute noch über 90% der Formwerkzeuge manuell feinbearbeitet. Das Arbeitsergebnis der Feinbearbeitung ist aufgrund der manuellen und meist individuellen Bearbeitungsstrategie Qualitätsschwankungen ausgesetzt. Der manuelle Prozess weist zudem eine eingeschränkte Reproduzierbarkeit auf. Dies wirkt sich insgesamt negativ auf die Bauteilqualität aus und ist oppositiv zu dem Trend beständig steigender Anforderungen an die Werkzeugqualität. [DRIE18; TÖNS02]

Nach einem formgebenden Fertigungsschritt, welcher zumeist durch spanende CNC-Fräs-/ Drehbearbeitung ausgeführt wird, erfolgt die Feinbearbeitung durch Schleifen und Polieren. Wesentliche Anforderung der Oberflächengüte an die Feinbearbeitung ist das Erstellen eines homogenen Schliffbilds. Dies wird zum Stand der Technik durch eine händische, kraftgeführte Schleifprozedur erreicht. Hierbei führt der Handwerker ein Schleifwerkzeug mit einer definierten Anpresskraft über das Bauteil. Der Schleifprofiltiefe kann beim kraftgeführten Schleifen während des Prozesses durch die Verweilzeit und den Anpressdruck des Werkzeugs beeinflusst werden. Eine Änderung der Anpresskraft bei gleichbleibender Wirkfläche im Schneideneingriff zwischen Werkzeug und Werkstück wirkt sich unmittelbar auf die erreichte Schleifprofiltiefe aus. [TIMM90; TÜCK12]

Eine sich ändernde Kontaktzone zwischen Werkzeug und Werkstück tritt bei variierend gekrümmten Oberflächenkonturen auf. Die Änderung wird durch eine kontinuierliche Kraftanpassung intuitiv durch den Facharbeiter kompensiert. So wird eine konstante Schleifprofiltiefe erreicht. Kantenbereiche mit kleinen Radien werden aufgrund einer kleinen Wirkfläche zwischen Werkzeug und Werkstück mit geringen Kräften bearbeitet. Ebene Bereiche weisen eine große Auflagefläche des Werkzeugs auf. Sie erfordern eine höhere Anpresskraft, um einen gleichen Anpressdruck in der Wirkfläche zu erreichen. Bestehende Automatisierungsansätze erlauben eine konstantkraftgeregelte Feinbearbeitung mit z.B. axial-nachgiebigen Systemen. Die Systematik berücksichtigt jedoch nicht eine Anpassung der Kraft bei sich ändernden geometrischen Eingriffsverhältnissen der Wirkfläche zwischen Werkzeug und Werkstück [DRIE18; TÜCK12].

Eine weitere Herausforderung in der Automatisierung solcher Prozesse besteht durch die maschinen- bzw. roboterbasiert ausgeführte Prozesskinematik. Hierbei werden durch den Schleifprozess bedingte Bearbeitungsspuren erzeugt. Schwingungsunterstützte Verfahren haben das Potenzial, das Auftreten von Schleifspuren zu vermeiden [BLEI16; HÄHN19; HÖCH22].

Werkzeugkonturbereiche, Formabweichungen sowie durch den Automatisierungsprozess entstandene Bearbeitungsspuren müssen aus den genannten Gründen weiterhin in zeit- und kostenintensiven manuellen Folgeschritten nachbearbeitet bzw. entfernt werden [GRAN15; TÖNS01].

Ziel dieser Arbeit ist es daher, ein zerspanendes Fertigungsverfahren zu entwickeln, dass der Herstellung einer geschliffenen Werkzeugoberfläche dient. Das Verfahren soll eine Anpassungsfähigkeit an einen sich durch gekrümmte Bauteile ändernde Kontaktzone im Schneideneingriff aufweisen und kinematisch bedingte Bearbeitungsspuren minimieren oder gar verhindern.

Dazu wird ein hybrides, variationskraftgeregeltes, schwingungsunterstütztes, zonales Verfahren für das Schleifen mit elastischen Schleifstiften entwickelt. Eine variierende Anpresskraft während der Schleifbearbeitung von gekrümmten Oberflächen dient der Einstellung einer konstanten Pressung

zwischen Werkzeug und Werkstück. Mit der Schwingungsunterstützung soll durch Oszillation eine Überlagerung der konventionellen Schleifkinematik mit einer zusätzlichen, niederfrequent-oszillierenden ( $< 100$  Hz) Wirkbewegung bei relativ großen Amplituden (ca. 0,5 - 3 mm) erreicht werden. Die Überlagerungsbewegung wird einachsig und werkstück- sowie werkzeuggeführt realisiert.

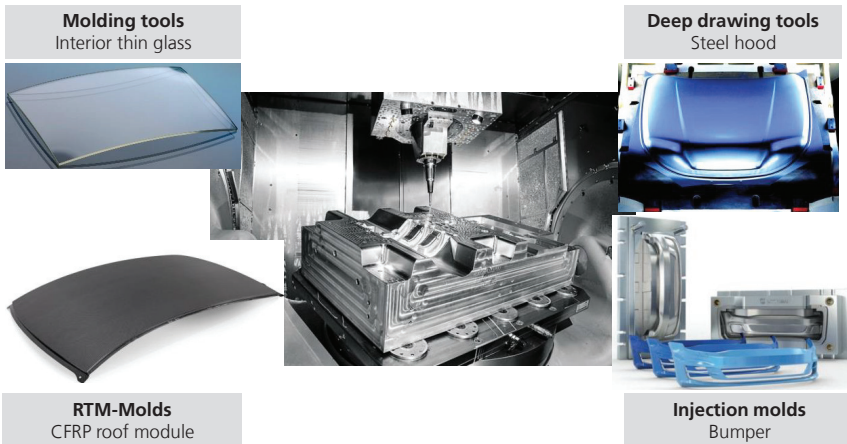
Zunächst erfolgt die Entwicklung eines beschreibenden Zerspanungsmodells für das variationskraft-geregelte Schleifen, sowie dessen Implementierung in eine Applikation zur Anwendung der Prozesssystematik. Neben der Modellierung und der Entwicklung einer Methodik und Applikation, erfolgt die technologische Weiterentwicklung und Einbindung zur Umsetzung des Prozesses.

Zur Vermeidung von Mischeffekten werden der Einfluss einer Schwingungsunterstützung und das Kraftmodell durch Prozessuntersuchungen analysiert, validiert und qualifiziert. Für Grundlagenuntersuchungen werden Schwingungen werkstückseitig angeregt. Hierfür wird ein eigens entwickelter Versuchsaufbau verwendet. Im Rahmen der Überführung auf gekrümmte Flächen erfolgt eine werkzeugseitige Schwingungsunterstützung. Hierbei werden die Anpassungssystematik für gekrümmte Werkzeugoberflächen und Schwingungsunterstützung durch eine Systementwicklung zusammengeführt. Der Gesamtprozess wird anhand von Prozessuntersuchungen an einer variierend gekrümmten Bauteilkontur untersucht.

Fokus der Analysemethodik sind Oberflächentextur und -topografie im Kontext der Erreichbarkeit eines einheitlichen Schliffbilds. Weiter werden grundlegende Effekte der Schwingungsunterstützung und der modellbasierten Anpassungsregelung auf z. B. die Oberflächenrauheit und Schleifprofiltiefe untersucht. Ziel der Variationskraftregelung ist die Erreichung einer konstanten Schleifprofiltiefe. Zur Prozessbewertung wird die Profiltiefe an verschiedenen Krümmungsbereichen gemessen und einer konventionellen Bearbeitung gegenübergestellt.

## Introduction

Grinding is a fine machining process for finishing components. The process is carried out following upstream, shaping manufacturing processes (e. g. milling or eroding) [TIMM90]. One of the core industries of grinding is tool and die making. The industry represents one of the most important economic sectors in Germany. According to calculations by the German Engineering Federation VDMA, precision tools with a production value of circa 11.5 billion euros were manufactured in 2018, with a sales growth of approximately 8% compared to the previous year. Toolmaking accounts for approximately 50% of this, with hollow molds for primary or forming processes being the main products. Application fields of the industry are shown in **Figure 1-1**. [ALFR20; BOOS17]



**Figure 1-1: Application fields of tool steels [BÖHL16; DEUT14]**

The tool and die industry is facing a globalized market, which on the one hand is experiencing increasing growth and on the other hand demands shorter delivery times with increasing mold and surface quality. This results in an increasing effort to produce the tools with an internationally competitive wage and production cost situation. [BOOS17]

In addition to the existing international competition, companies are facing new challenges in production. For example, topics such as resource efficiency and environmentally friendly and individualized production have long been an integral part of strategic planning, which sometimes serve as measures to mitigate the global effects of climate change. Corporate resilience, a trend reinforced by the Corona pandemic, and the associated more flexible and in some cases more self-sufficient production are also fueling the technological shift towards more efficient supply chains. EU regulations in the form of carbon footprint reduction certificates are a key driving factor for an industrial transformation towards an industrial landscape that efficiently combines ecology and economy. [BERG20]

Consequently, there is significant cost pressure on the industry, which can be countered by further technologization, e. g. through automation. In the tool and die industry, fine machining is the only production step in the entire process chain for the manufacture of molds that has not been automated to date. Today, more than 90% of the molds are still precision machined manually. Due to the manual and mostly individual machining strategy, the work result of precision machining is

subject to quality fluctuations and has a limited reproducibility. This has an overall negative effect on the component quality and is opposed to the trend of constantly increasing demands on tool quality. [DRIE18; TÖNS02]

After a shaping production step, which is mostly carried out by CNC milling/turning, the finishing is done by grinding and polishing. An essential requirement of the surface quality of the fine machining is the creation of a homogeneous micrograph. At the state of the art, this is achieved by a manual, power-guided grinding procedure. In this process, the craftsman guides a grinding tool over the component with a defined contact force. The material removal rate during polishing or the stock removal rate during force-guided grinding can be influenced during the process by the dwell time and the contact pressure of the tool. A change in the contact pressure with a constant effective area in the cutting engagement between the tool and the workpiece has a direct effect on the grinding profile depth achieved. [TIMM90; TÜCK12]

A changing contact zone between tool and workpiece occurs with varying curved surface contours. The change is intuitively compensated by the skilled worker through a continuous force adjustment. In this way, a constant grinding profile depth is achieved. Edge areas with small radii are machined with low forces due to a small effective area between tool and workpiece. Flat areas have a large contact surface of the tool. They require a higher contact force to achieve the same contact pressure in the effective area. Existing automation approaches allow constant force controlled fine machining with e. g. axial compliant systems. However, the system does not consider an adjustment of the force in case of changing geo-metric engagement ratios of the effective surface between tool and workpiece [DRIE18; TÜCK12].

Another challenge in the automation of such processes is the machine- or robot-based process kinematics. In this case, machining marks caused by the grinding process are generated. Vibration-assisted processes have the potential to avoid the occurrence of grinding marks [BLEI16; HÄHN19; HÖCH22].

Complex contour areas, shape deviations as well as machining traces created by the automation process still must be reworked or removed in time-consuming and cost-intensive manual subsequent steps for the reasons mentioned [GRAN15; TÖNS01].

Therefore, the aim of this work is to develop a machining process to produce a ground tool surface. The process should be adaptable to a changing contact zone in the cutting-edge engagement due to curved components and minimize or even prevent kinematically caused machining marks.

For this purpose, a hybrid, variation-force-controlled, vibration-assisted, zonal process for grinding with elastic mounted points is being developed. A varying contact force, during grinding of curved surfaces, is used to set a constant pressure between tool and workpiece. The oscillation excitation is intended to achieve a superimposition of the conventional grinding kinematics with an additional, low-frequency oscillating ( $< 100$  Hz) effective movement at relatively large amplitudes (approx. 0.5 - 3 mm). The superimposed movement is realized uniaxially and workpiece- as well as tool-guided.

First, a descriptive machining model for variable force-controlled grinding is developed and implemented in an application for the application of the process system. In addition to the modeling and the development of a methodology and application, the technological development and integration for the implementation of the process is carried out.

To avoid mixing effects, the influence of a vibration excitation and the force model are analyzed, validated, and qualified by process investigations. For basic investigations, vibrations are excited on the workpiece side. A specially developed experimental setup is used for this purpose. In the context of the transfer to curved surfaces, vibration excitation is performed on the tool side. Here, adaptation systems for curved tool surfaces and vibration support are combined by a system development. The overall process is investigated by means of process tests on a variably curved component contour.

The focus of the analysis methodology is on surface texture and topography in the context of the achievability of a uniform grinding pattern as well as fundamental effects of vibration excitation and model-based matching control on e. g. surface roughness and grinding pro-filtration depth. The aim of the variation force control is to achieve a constant grinding profile depth. For process evaluation, the profile depth is measured at different curvature areas and compared with conventional machining.