

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Innerhalb industrieller Wertschöpfungsketten nimmt der Werkzeug- und Formenbau als Zulieferer für die Automobil-, Konsumgüter-, Luftfahrt- und Elektroindustrie eine Schlüsselstellung ein [ZEDT17, S.1] [EVER98, S.1]. Deutschland ist der viertgrößte Produzent von Werkzeugen weltweit [BOOS18a, S.33]. Dabei liegt der Fokus, wie in Abbildung 1.1 gezeigt, auf der Herstellung von Spritzgießwerkzeugen (59%), gefolgt von Stanzbiegewerkzeugen (35%) und Kalt- und Warmmassivumformwerkzeugen (6%) [BOOS18b, S.21]. Die Branche zeichnet sich durch eine ausgesprochene Heterogenität und starke Fragmentierung aus. Über 72% der insgesamt ca. 3.800 Werkzeugbaubetriebe in Deutschland haben weniger als 50 Mitarbeiter und nur 1% der Unternehmen beschäftigen mehr als 100 Mitarbeiter [BOOS18b, S.15]. Die überwiegend kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) produzierten im Jahr 2016 Werkzeuge im Wert von 5,1 Mrd. EUR [BOOS18b, S.16]. Dies ist eine Steigerung um 7% im Vergleich zum Vorjahr [BOOS18a, S.34].

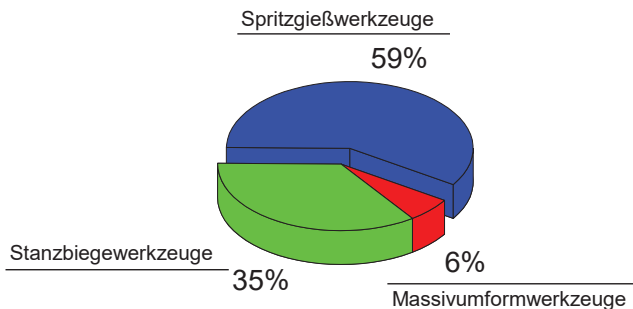


Abbildung 1.1: Werkzeugproduktion in Deutschland 2016: Insgesamt wurden Werkzeuge im Wert von 5,1 Mrd. EUR in Deutschland produziert. Der Großteil entfällt mit 59% auf Spritzgießwerkzeuge (3,01 Mrd. EUR), gefolgt von Stanzbiegewerkzeuge mit 35% (1,79 Mrd. EUR) und Umformwerkzeuge mit 6% (0,31 Mrd. EUR). [BOOS18b, S.21]

Werkzeugformen werden für die Fertigung von mehreren 100.000 Endprodukten verwendet. Ihr Kostenanteil kann dabei stark variieren und zwischen 5% [ZEDT17, S.1] und 30% [EVER98, 2] der gesamten Produktionskosten eines Enderzeugnisses liegen. Gleichzeitig werden 90% der Profitabilität des Enderzeugnisses durch die konstruktive Gestaltung und fertigungstechnische Umsetzung der Werkzeugform beeinflusst [ZEDT17, S.1]. Dem an der Schnittstelle zwischen Entwicklung und Fertigung angesiedelten Werkzeugbau kommt somit eine entscheidende Bedeutung hinsichtlich

des wirtschaftlichen Erfolgs des herzustellenden Erzeugnisses zu. Die Herausforderung für Unternehmen besteht in der Erfüllung unterschiedlicher und häufig konträrer Zielgrößen im Spannungsfeld zwischen Zeit, Kosten und Qualität [EVER98, S.1].

Die in der Werkzeugbranche eingesetzten Fertigungsprozessketten sind keineswegs eindeutig. Deutsche Werkzeugbaubetriebe bedienen sich eines breiten Technologiespektrums im Herstellungsprozess. Im Durchschnitt kommen in Deutschland 11,9 verschiedene Fertigungstechnologien zum Einsatz [BOOS18b, S.28]. Die Verfahren reichen von der ausschließlichen Senkerodier- und Fräsbearbeitung, wobei die Senkerodierelektroden mittels Fräsen hergestellt werden, bis hin zur kombinierten Bearbeitung des Konturvorfrens und des Schlichterodierens. Ein Oberflächenfinish kann entweder mittels Schleifen, Läppen, Polieren oder Strukturieren erfolgen [MENG07, S.845–862] [KLOC09, S.130]. Die aufgezeigten Prozessschritte sind auch an einem Hochlohnstandort wie Deutschland zu einem großen Teil von manueller Vor- und Nachbearbeitung geprägt [DAMB05, S.12] [MENG07, S.805–806]. Aus diesem Grund liegt auch der Anteil der Personalkostenquote bei Werkzeugbauunternehmen mit durchschnittlich 45% besonders hoch im Vergleich zu anderen Wirtschaftszweigen und ist beispielsweise doppelt so hoch wie in der Automobilindustrie [ZEDT17, S.1]. Erschwerend kommt hinzu, dass der Wettbewerb – insbesondere aus Osteuropa und Asien – deutlich zugenommen hat und aufgrund der hiesigen Lohnkosten nur durch Technologieführerschaft zu gewinnen ist [KLOC05, 33]. Gefragt sind zukünftig daher deterministische Bearbeitungsverfahren mit einem hohen Automatisierungsgrad, um einerseits den Anteil der Lohn- an den Herstellungskosten von Werkzeugformen zu senken und andererseits die Durchlaufzeit der Fertigung von Werkzeugformen und damit den „Time-to-Market“-Zyklus zu reduzieren.

Dem finalen Oberflächenstrukturieren kommt bei der Herstellung von Werkzeugformen eine entscheidende Bedeutung zu. Bei der überwiegend eingesetzten Fertigungsmethode des Spritzgießens können Fließlinien, Wirbel, Einfallstellen oder andere fertigungsbedingte Unregelmäßigkeiten auftreten, die mit genarbten Oberflächen vermindert oder gar ganz abgestellt werden können. Darüber hinaus wird das Fließverhalten während des Einspritzvorgangs und die Dimensionsstabilität durch Rippen- und Sickenwirkung der Struktur verbessert [MENG07, S.852–853] [WIED97, S.10]. Weiterhin verleiht die im Werkzeug eingebrachte Struktur dem sonst glatten Kunststoffzeugnis ein ästhetisches und angenehmes Aussehen. Die darüber hinaus verbesserte Haptik lässt es wertvoller erscheinen und ist kratz- und griffunempfindlicher [MENG07, S.852] [WIED97, S.9].

Designoberflächen haben in den letzten Jahrzehnten mehr und mehr an Bedeutung gewonnen. Insbesondere bei Konsumgütern aus Kunststoff nehmen Haptik und Optik von Oberflächen bei der Kaufentscheidung einen zentralen Stellenwert ein. Dieser Trend reicht von der Spielzeug- und Möbelindustrie bis hin zur Automobilindustrie. Während in der Möbelindustrie Holzimitationen verkaufsfördernd wirken, so zeigen in der Automobilindustrie strukturierte Oberflächen überwiegend eine Ledernarbung

[WIED97, S.9]. Bei PKW machen Kunststoffe mittlerweile mehr als 15% des Gesamtfahrzeuggewichts aus, Tendenz steigend. Die Hälfte der Kunststoffbauteile entfällt dabei auf das Interieur und besitzt damit überwiegend einen dekorativen Charakter [RAU03, S.239] [GAYE08, S.21]. Zuvorderst zu nennen sind bei den Innenraumbauteilen das Armaturenbrett sowie die Verkleidung und Zierleisten von Türen und Sitzen, die eine Gesamtfläche von etwa 5,25 m<sup>2</sup> ausmachen [FROS16, S.23]. Ihre Aufgabe ist es, dem potentiellen Käufer Gefühle von Exklusivität, Ergonomie und Innovation zu vermitteln [GAYE08, S.32] [FROS16, S.12]. Insbesondere mit der Entwicklung des autonomen Fahrzeugs durchlebt ebenso das Interieur einen Wandel. Der Innenraum der Zukunft wird entsprechend von neuen Konzepten geprägt werden [KLEI18, S.133].

Zur Herstellung der Mikrostrukturen in Werkzeugformen kommen abhängig von den Anforderungen an Werkstoff, Komplexität und Qualität unterschiedliche Verfahren zum Einsatz, die in Kapitel 2.1 näher beschrieben werden. Neben dem mechanischen Mikrofräsen werden derzeit ebenso die Senkerosion sowie das photochemische Ätzen zur Erzeugung mikrostrukturierter Oberflächen im Werkzeugbau angewandt [BRÜN14, S.920]. Während beim Mikrofräsen die minimalen Strukturgrößen aufgrund kommerziell verfügbarer Fräserdurchmesser auf etwa 50 µm beschränkt sind [MENG07, S.843] und vergütete Werkstoffe mit einer Härte größer als 45 HRC nicht wirtschaftlich bearbeitet werden können [MENG07, S.769], so ist das Senkerodieren auf elektrisch leitfähige Materialien limitiert. Das Werkstück ist bei der Bearbeitung sehr hohen Temperaturen ausgesetzt, wodurch sich eine unvorteilhafte Wärmeeinflusszone in Oberflächennähe ausbildet [KLOC04, S.193] [MENG07, S.850]. Während des laufenden Prozesses ist die strukturgebende Stempелеlektrode einem stetigen Verschleiß analog zum zerspanenden Mikrofräsen ausgesetzt [STEP11, S.8] [MENG07, S.847]. Zur Automatisierung in der Senkerosion hat sich bis heute eine CAM-Schnittstelle nicht vollständig durchgesetzt [BOOS18b, S.33]. Das in der Industrie am meisten eingesetzte strukturgebende Verfahren ist die Fotolithographie unter der Verwendung der Maskenbelichtung. Mit diesem Verfahren können minimale Strukturgrößen im Submikrometerbereich generiert werden, was überwiegend in der Halbleitertechnik Anwendung findet. Im Werkzeugbau sind Strukturgrößen mehrerer Mikrometer üblich. Der Materialabtrag erfolgt im Säurebad simultan über die gesamte Werkzeugoberfläche mit einer Ätzgeschwindigkeit je nach Werkstoff und Ätzbedingungen zwischen 0,018 mm/min und 0,08 mm/min [KLOC07, S.176]. Dementsprechend können übliche Strukturturen von 150 µm innerhalb weniger Minuten erzielt werden. Nachteilig sind hierbei die kostspielige Maskenherstellung, die aufwendige, von manuellen Schritten geprägte Prozessvor- und Nachbereitung sowie die eingeschränkte Designfreiheit der Strukturen. Es können nur Strukturen mit Schwarz/Weiß-Kontrast hergestellt werden [WIED97, S.10]. Dreidimensionale Strukturen mit definierter Steigung (z.B. kugelförmige Vertiefung, pyramidenähnliche Muster, definierte Flankenwinkel) sind nicht möglich [WIED97, S.17].

Vor diesem Hintergrund hat sich die Laserstrukturierung unter Verwendung von Nanosekunden gepulster Laserstrahlung mittlerweile als konkurrierendes Verfahren in der