

1 Einleitung

Introduction

Der Fortschritt der industriellen Megatrends der Automatisierung und Digitalisierung erfordert die Vernetzung einer Vielzahl von Sensoren und Aktoren mit den dazugehörigen Steuerungselementen. Die Verbindung der Komponenten untereinander erfolgt zumeist mit kabelgebundener Signalverdrahtung und Energieversorgung. In dem Marktsegment der Fertigung von Verbindungselementen für die Elektro- und Elektronikindustrie herrscht aufgrund der hohen Stückzahlen und des geringen Differenzierungspotentials der gefertigten Bauelemente ein hoher Kostendruck. Für Lohnfertiger in der Elektroindustrie in Hochlohnländern entsteht daraus der Bedarf, möglichst hohe Automatisierungsgrade in der Fertigung zu realisieren, um Lohnkosten einsparen und so am weltweiten Markt bestehen zu können.

Verbindungselemente mit Nennströmen bis ca. $I_N = 16 \text{ A}$ erfordern kleine Leiterquerschnitte. Diese Bauteile werden zumeist durch Blechumformung gefertigt. Bei Bauteilen, die für Nennströme ab ca. $I_N = 32 \text{ A}$ ausgelegt sind, sind größere leitfähige Querschnitte erforderlich. Daher werden die Bauteile durch Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide gefertigt. Aufgrund der hohen Stückzahlen im Bereich von einigen Millionen bis zu einer Milliarde Stück pro Jahr [DEUT01a] werden für die Fertigung Rundtaktautomaten mit NC- oder Kurvenscheibensteuerung eingesetzt, Abbildung 1.1. Typische Taktzeiten liegen im Bereich von $t = 1$ bis $t = 3 \text{ s}$. Diese Rundtaktautomaten weisen zumeist eine einfache Kinematik auf, sodass Vorschubbewegungen nur in einer Achse je Station möglich sind.

Elektrotechnische Verbindungselemente wie Durchgangsreihenklemmen (Abbildung 1.1) weisen häufig rechteckige Querschnitte auf, in denen Kabelenden eingelegt und durch eine Schraube fixiert werden. Zur Fertigung dieser Querschnitte wird zunächst eine Bohrung eingebracht. Anschließend wird in einem oder mehreren Tauchfrähschnitten die Bohrung zu einem länglichen Querschnitt erweitert. Diese tauchgefräste Kavität dient dann als Führung für den abschließenden Räumprozess, bei dem enge Form- und Lagetoleranzen im Bereich $10 \mu\text{m} < \Delta x_{\text{max}} < 50 \mu\text{m}$ eingehalten werden müssen.

Aufgrund ihrer hervorragenden Zerspanbarkeit werden für diese Anwendung zumeist bleihaltige Automatenmessinge wie beispielsweise CuZn39Pb3 verwendet. Das enthaltene Blei setzt die Scherfestigkeit herab [DEUT07, NOBE16a]. Bei der Zerspanung entstehen deshalb kurze Bröckelspäne. Die Bildung eines Bleifilms zwischen dem ablaufenden Span und der Spanfläche des Werkzeugs reduziert die dort auftretende Reibung und den Werkzeugverschleiß erheblich. In der industriellen Praxis kann ein hoher Automatisierungsgrad nur aufgrund der guten Zerspanbarkeit und der damit einhergehenden hohen Prozesssicherheit erreicht werden [DEUT01a].

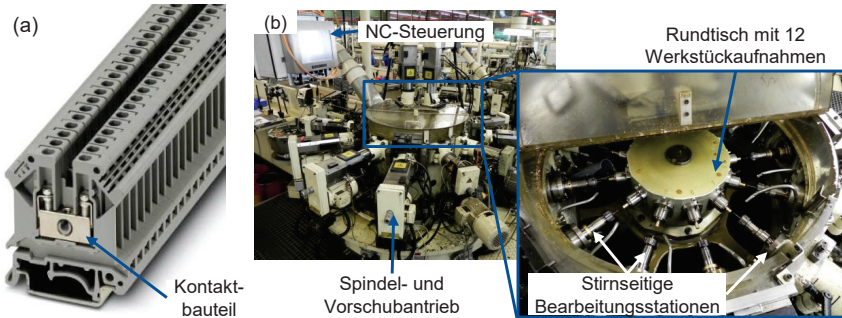


Abbildung 1.1: Durchgangsreihenklemme mit $I_N = 32$ A Nennstrom [ELEC21] (a) und Fertigung auf NC-gesteuertem Rundtaktautomaten [NOBE16b, S. 73f.] (b)
Feed-through terminal block with $I_N = 32$ A nominal current [ELEC21] (a) and Production on NC-controlled rotary transfer machines [NOBE16b, S. 73f.] (b)

Im menschlichen Körper wirkt Blei reproduktionstoxisch und schädigt das Nervensystem [WORL19]. Deshalb existieren in der europäischen Union Gesetzesinitiativen zur Beschränkung des Bleigehalts in Kupfer- und anderen Werkstoffen. Für die europäische Elektroindustrie ist primär Richtlinie 2011/65/EU („Restriction of hazardous substances“, RoHS) relevant, die einen Grenzwert von $m_{Pb} < 0,1 \text{ \%}_{\text{mass}}$ für Kupferbasislegierungen vorschreibt [EURO11]. Der Begriff bleifrei wird daher im Rahmen dieser Arbeit verwendet, um Werkstoffe mit $m_{Pb} < 0,1 \text{ \%}_{\text{mass}}$ zu bezeichnen.

Im Vergleich zu den aktuell verwendeten Werkstoffen bedingt die Zerspaltung dieser Werkstoffe eine höhere Zerspalkraft, eine ungünstigere Spanform, einen erhöhten Werkzeugverschleiß und eine reduzierte Bauteilqualität [NOBE16a]. Umfangreiche Forschungsarbeiten zur Zerspaltung bleifreier Messingwerkstoffe fokussierten sich auf das Drehen [NOBE13, NOBE16a] oder Bohren [KATO14, NOBE16b, ZOGH21]. Zusätzlich existiert eine Forschungsarbeit zum Hochgeschwindigkeitsfräsen von Kupferwerkstoffen mit Schnittgeschwindigkeiten ab $v_c = 1000$ m/min [GREI90].

Beim Tauchfräsen von elektrotechnischen Verbindungselementen aus bleifreien Messingwerkstoffen entstehen Abweichungen von der Sollgeometrie aufgrund von seitlicher Abdrängung des Fräasers. Weiterhin brechen die eingesetzten Werkzeuge sporadisch, sodass die Prozesssicherheit insgesamt gering ist. Eine automatisierte Massenfertigung ist deshalb nicht möglich. Der Prozess wird daher aktuell nur für die Erprobung und Kleinserienfertigung eingesetzt. Um die branchenweite Einführung bleifreier Messingwerkstoffe zu unterstützen, ist deshalb eine systematische Analyse der relevanten zerspantchnologischen Phänomene sowie eine grundlegende Optimierung der Prozesseinstellgrößen erforderlich. Das angestrebte Ergebnis dieser Arbeit ist daher die Entwicklung eines Gestaltungsmodells für die Werkzeug- und Prozessauslegung beim Tauchfräsen von bleifreien Messingwerkstoffen, das eine Steigerung der Prozesssicherheit und Produktivität gegenüber dem Stand der Technik ermöglicht.

Introduction

The progress of the industrial megatrends of automation and digitalization necessitates the networking of a multitude of sensors and actuators with their corresponding control elements. The connection of the components is mostly accomplished through wired signal wiring and power supply. In the market segment of manufacturing connection elements for the electrical and electronic industry, there is significant cost pressure due to the high production volumes and the low differentiation potential of the manufactured components [DEUT01a]. For manufacturers in the electrical industry in high-wage countries, there is a need to achieve as high a degree of automation in manufacturing as possible in order to save labor costs and thus remain competitive in the global market.

Connection elements with rated currents of up to approximately $I_N = 16$ A require relatively small conductor cross-sections. These components are mostly manufactured through sheet metal forming. For components designed for rated currents of approximately $I_N = 32$ A and above, larger conductive cross-sections are required. Therefore, these components are manufactured through machining with geometrically defined cutting edges [DEUT01a]. Due to the high production volumes ranging from several million to one billion pieces per year [DEUT01a], rotary indexing machines with NC or cam disk control are used for manufacturing, as shown in Figure 1.1. Typical cycle times range from $T = 1$ s to $T = 3$ s. These rotary indexing machines mostly have a simple kinematics, allowing feed movements only in one axis at each station.

Electrical connection elements such as through-terminal blocks (Figure 1.1) often have rectangular cross-sections in which cable ends are inserted and fixed by a screw. To manufacture these cross-sections, a bore is first made. Subsequently, in one or more plunge milling passes, the bore is enlarged into an elongated cross-section. This plunge-milled cavity then serves as a guide for the final reaming process, where tight form and positional tolerances in the range of $10 \mu\text{m} < \Delta x_{\text{max}} < 50 \mu\text{m}$ must be maintained.

Due to their excellent machinability properties, lead-containing free-cutting brasses such as CuZn39Pb3 are mostly used for this application. The included lead reduces shear strength, resulting in short chip breakages during machining. The formation of a lead film between the exiting chip and the tools rake face significantly reduces friction and tool wear [DEUT07, NOBE16a]. In industrial practice, a high degree of automation is achieved due to good machinability and the associated high process reliability [DEUT01a].

In the human body, lead acts as a reproductive toxicant and damages the nervous system [WORL19]. Therefore, there are legislative initiatives in the European Union to restrict the lead content in copper and other materials. For the European electrical industry, Directive 2011/65/EU ("Restriction of hazardous substances", RoHS) is primarily relevant, which prescribes a limit of $m_{\text{Pb}} < 0.1 \text{ \%}_{\text{mass}}$ for copper-based alloys

[EURO11]. The term "lead-free" is therefore used in this work to refer to materials with $m_{Pb} < 0.1 \text{ \%}_{\text{mass}}$.

Compared to currently used leaded materials, machining of these materials results in higher cutting forces, unfavorable chip formation, increased tool wear, and reduced component quality [NOBE16a]. Extensive research on the machining of lead-free brass materials has focused on turning [NOBE13, NOBE16a] or drilling [KATO14, NOBE16b, ZOGH21]. Additionally, there is research on high-speed milling of copper materials with cutting speeds starting at $v_c = 1000 \text{ m/min}$ [GREI90].

During plunge milling of electrical connection elements made of lead-free brass materials, deviations from the desired geometry occur due to lateral deflection of the milling cutter. With the currently industrially applied process design, the economic and technical requirements for connection elements with rectangular cable clamping areas cannot be met. Furthermore, due to tool breakage, process reliability is insufficient for automated mass production. To support the industry-wide introduction of lead-free brass materials, a systematic analysis of relevant machining phenomena and a fundamental optimization of process parameters are required. The desired outcome of this work is therefore the development of a design model for tool and process design in plunge milling of lead-free brass materials, enabling increased process reliability and productivity compared to the state of the art.