

# 1 Introduction

## *Einleitung*

The global metal cutting tools market refers to the market for tools used in the manufacturing industry to cut metal. These tools are used in a variety of machining applications, including milling, turning, drilling, and grinding. The market had a size of approximately USD 76 billion in 2022 and is driven by factors such as the increasing demand for metal products and the growing need for precision and efficiency in manufacturing processes [FORT22]. About 65 % of metal cutting tools are made from cemented carbide due to its high hardness, wear resistance, and toughness [PERS19, KLOC18]. Cemented carbide is made of tungsten carbide and cobalt. The proportion of cobalt is in the range of 5 to 12 % [ISO513:2012].

There are several factors that might lead to an increase in the consumption of cobalt and tungsten, including economic growth, rising standards of living across the globe and technological advancements: Electric vehicles, smart devices and renewable energy systems require cobalt for their batteries. Especially, the trend of intelligent transportation systems with Battery Electric Vehicles (BEV), which are growing at a Cumulative Annual Growth Rate (CAGR) of 17 % [STAT 22a], leads to an increased demand for the resources and therefore significant price increases for cutting tools may be expectable in the coming years. In 2022 prices for cutting tools increased between 5 - 25 % across major cutting tools manufacturers [SEIS22].

During manufacturing of aerospace engine components, high tool wear is generated. This is due to the use of hard to cut materials such as nickel-based alloys which are often required to produce aerospace engine components. Their outstanding properties make it difficult to machine and lead to severe milling tool wear, which can affect the quality of the product [MOHA20]. The decrease in product quality due to tool wear and the resulting machine downtime due to frequent tool changes are the main challenges in machining [BIND17]. Tool wear is thus responsible for high production costs and poor surface qualities, resulting in an increased need for optimization especially in workpiece surface generating finish milling operations. For the estimation of the tool life, empirical wear models may be applied, which require complex and cost-intensive experiments for the generation of the model data [ZHOU18].

Apart from the literature study, interviews with experts from the metal cutting industry were conducted to size the importance of the cutting tool wear problem. Especially in manufacturing of aerospace components, the tool costs currently amount approximately 8 % of the costs of goods sold, according engineers from the industry, see also Section 4.1, Surveys with Industry Professionals. In actual practice, there are three ways to cope with the cutting tool wear problem usually applied in series production, in research and development and in small batch production:

1. Fixed tool life from prior experiments with a safety margin to account for outliers
2. Creation of tool life models to allow a prediction of tool life across a range of cutting speed and/or other cutting parameters

### 3. Optical observation and assessment of the tool status by the machine tool operator

The first approach requires costly testing and is applicable for series production with highly repetitive processes and fixed process conditions. The safety margin applied to account for outliers, which are tools that fail earlier, results in a waste of numerous good tools. The second approach, tool life modelling, is complex and cost-intensive since many experiments are required for the generation of the model data. The last approach is common in single part or small batch production, it relies on experience of the machine tool operator and is thus not automated.

The above-mentioned data and argumentation provide motivation to increase cutting tool utilization. Making the best use of each individual tool regarding its tool life, could be achieved through intelligent assistance and automation solutions. This thesis aims to explore potential methods for addressing tool wastage in the future through the utilization of inline metrology, specifically, the capture of images within the machine tool, coupled with AI-based image processing. Specifically, an approach to segment flank wear on cutting tool edges with a U-Net model architecture is presented. Furthermore, an investigation of the influence of model hyperparameters and dataset properties on the neural network model's performance is conducted. Based on the findings, an approach to creating a decision model for hyperparameter optimization based on dataset properties is developed for these most influential factors. Finally, the approach is used to train a U-Net for a specific dataset made with an inline microscope that acquires cutting tool edge images within a machine tool.

# 1 Einleitung

## *Introduction*

Der Weltmarkt für Zerspanungswerkzeuge bezieht sich auf den Markt für Werkzeuge, die in der Fertigungsindustrie zum Zerspanen von Metall verwendet werden. Diese Werkzeuge werden in einer Vielzahl von Bearbeitungsanwendungen eingesetzt, darunter Fräsen, Drehen, Bohren und Schleifen. Der Markt hat ein Volumen von ca. 76 Mrd. USD im Jahr 2022 und wird durch Faktoren wie die steigende Nachfrage nach Metallprodukten und den wachsenden Bedarf an Präzision und Effizienz in Fertigungsprozessen angetrieben [FORT22]. Etwa 65 % der Zerspanungswerkzeuge werden aufgrund ihrer hohen Härte, Verschleißfestigkeit und Zähigkeit aus Hartmetall hergestellt [PERS19, KLOC18]. Sinterkarbid wird aus Wolframkarbid und Kobalt hergestellt. Der Anteil an Kobalt macht zwischen 5 bis 12 % aus [ISO513:2012].

Es gibt mehrere Faktoren, die zu einem Anstieg des Verbrauchs von Kobalt und Wolfram führen könnten, darunter das Wirtschaftswachstum, der steigende Lebensstandard auf der ganzen Welt und der technische Fortschritt: Elektrofahrzeuge, intelligente Geräte und erneuerbare Energiesysteme benötigen Kobalt für ihre Batterien. Insbesondere der Trend zu intelligenten Verkehrssystemen mit batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen (BEV), die mit einer jährlichen Wachstumsrate von 17 % wachsen [STAT 22b], führt zu einer erhöhten Nachfrage nach den Ressourcen, so dass in den kommenden Jahren mit einem erheblichen Preisanstieg für Zerspanungswerkzeuge zu rechnen ist. Im Jahr 2022 stiegen die Preise für Zerspanungswerkzeuge bei den wichtigsten Herstellern von Zerspanungswerkzeugen zwischen 5 und 25 % [SEIS22].

Bei der Herstellung von Triebwerkskomponenten für die Luft- und Raumfahrt kommt es zu einem hohen Werkzeugverschleiß. Dies ist auf die Verwendung von schwer zerspanbaren Werkstoffen wie Nickelbasislegierungen zurückzuführen, die in Triebwerkskomponenten für die Luft- und Raumfahrt eingesetzt werden. Ihre hervorragenden Eigenschaften erschweren die Bearbeitung und führen zu einem hohen Verschleiß der Fräswerkzeuge, was die Qualität des Produkts beeinträchtigen kann [MOHA20]. Die Abnahme der Produktqualität aufgrund von Werkzeugverschleiß und die daraus resultierenden Maschinenstillstandszeiten aufgrund häufiger Werkzeugwechsel sind die größten Herausforderungen bei der Bearbeitung [BIND17]. Der Werkzeugverschleiß ist somit für hohe Produktionskosten und schlechte Oberflächenqualitäten verantwortlich, was zu einem erhöhten Optimierungsbedarf insbesondere bei werkstückoberflächenerzeugenden Schlichtfräsoperationen führt. Zur Abschätzung der Werkzeugstandzeit können Verschleißmodelle eingesetzt werden, die komplexe und kostenintensive Experimente zur Generierung der Modelldaten erfordern [ZHOU18]. Neben der Literaturstudie wurden Interviews mit Personen aus der Zerspanungsindustrie geführt, um die Bedeutung des Verschleißproblems bei Zerspanungswerkzeugen zu ermitteln. Insbesondere bei der Herstellung von Bauteilen für die Luft- und Raumfahrt belaufen sich die Werkzeugkosten nach Angaben von acht Forschungs- und Entwicklungsingenieuren

aus der Branche derzeit auf etwa 8 % der Umsatzkosten des Produkts, siehe Abschnitt 4.1, Surveys with Industry Professionals. In der Praxis gibt es drei Möglichkeiten zur Bewältigung des Werkzeugverschleißproblems, die in der Regel in der Serienfertigung, in Forschung und Entwicklung und in der Kleinserienfertigung angewandt werden:

1. Festlegen der Standzeit aus einer vorherigen Prüfung mit einer Sicherheitsmarge, um Ausreißer zu berücksichtigen
2. Erstellung von Standzeitmodellen, die eine Vorhersage der Werkzeugstandzeit über einen Bereich von Schnittgeschwindigkeiten und/oder anderen Schnittparametern ermöglichen
3. Optische Beobachtung und Bewertung des Werkzeugstatus durch den Bediener der Werkzeugmaschine

Der erste Ansatz erfordert kostspielige Versuche und ist für die Serienproduktion mit sich stark wiederholenden Prozessen und festen Prozessbedingungen geeignet. Die Sicherheitsmarge, die zur Berücksichtigung von Ausreißern, d. h. Werkzeuge die früher versagen, angewandt wird, führt dazu, dass zahlreiche Werkzeuge verschwendet werden. Der zweite Ansatz, die Modellierung der Werkzeugstandzeit, ist komplex und kostenintensiv, da viele Versuche für die Generierung der Modelldaten erforderlich sind [ZHOU18]. Der letzte Ansatz ist in der Einzelteil- oder Kleinserienfertigung üblich, er beruht auf der Erfahrung des Werkzeugmaschinenbedieners und ist daher nicht automatisiert.

Die oben genannten Daten und Argumente motivieren dazu, die Ausnutzung der Zerspanungswerkzeuge zu erhöhen. Um jedes individuelle Werkzeug möglichst gut auszunutzen, könnten intelligente Assistenz- und Automatisierungslösungen genutzt werden. Ziel dieser Arbeit ist es, potenzielle Methoden zu erforschen, um den Werkzeugverschleiß in der Zukunft durch den Einsatz von Inline-Messtechnik, insbesondere durch die Erfassung von Bildern innerhalb der Werkzeugmaschine, in Verbindung mit KI-basierter Bildverarbeitung, zu reduzieren. Konkret wird ein Ansatz zur Segmentierung des Freiflächenverschleißes an Schneidkanten mit einer U-Netz-Modellarchitektur vorgestellt. Darüber hinaus wird eine Untersuchung des Einflusses der Modellhyperparameter und Datensatzeigenschaften auf die Leistung des neuronalen Netzmodells durchgeführt. Auf der Grundlage der Ergebnisse wird ein Ansatz zur Erstellung eines Entscheidungsmodells für die Hyperparameteroptimierung auf der Basis von Datensatzeigenschaften für diese einflussreichsten Faktoren entwickelt. Schließlich wird der Ansatz verwendet, um ein U-Netz für einen spezifischen Datensatz zu trainieren, der mit einem Inline-Mikroskop erstellt wurde, das Bilder von Schneidkanten in einer Werkzeugmaschine erfasst.