

1 Ausgangssituation

1.1 Hintergrund und Problemstellung

Der bewusste und verantwortungsvolle Umgang mit Ressourcen sowie die Verfügbarkeit strategischer Rohstoffe zählen zu den bedeutendsten Herausforderungen einer modernen Industriegesellschaft. Wachsende Nachfrage, geopolitische Spannungen und ambitionierte Klimaziele rücken den Aspekt der Nachhaltigkeit für viele produzierende Unternehmen in den Fokus. [BMW20, S. 8 f., MES21, S. 11 f.] Spanenden Fertigungsprozessen kommt hierbei eine entscheidende Rolle zu, da sie sowohl einen energie- und ressourcenintensiven Charakter aufweisen [PAN22, S. 618] als auch in nahezu jedem produzierenden Unternehmen gebraucht werden. Diese Relevanz spiegelt sich auch in der wirtschaftlichen Bedeutung der Werkzeugmaschinenindustrie wider. Im Jahr 2023 wurden in Deutschland spanende Werkzeugmaschinen im Gesamtwert von 8,33 Mrd. € produziert¹. Mit 3,41 Mrd. € entfällt dabei ein erheblicher Anteil von 40,9 % auf Bearbeitungszentren und Fräsmaschinen [VDW24, S. 22].

Die eingesetzten Werkzeuge sind für die industrielle Zerspanung dabei von zentraler Bedeutung. Ihre Leistung beeinflusst direkt die Qualität und die Kosten der hergestellten Bauteile und wirkt sich somit auf die wirtschaftliche und ökologische Nachhaltigkeit der Zerspanprozesse aus. Hierzu kommen überwiegend Werkzeuge aus Hartmetall zum Einsatz [SCH25, S. 681, WES17, S. 19]. Sie verbinden hohe Verschleißfestigkeit mit thermischer Belastbarkeit und erfüllen damit die anspruchsvollen technischen Anforderungen moderner Zerspanprozesse – insbesondere bei der Bearbeitung metallischer Werkstoffe [KÜH22, S. 260]. Trotz ihrer hohen technischen Leistungsfähigkeit ist der Einsatz von Hartmetallen mit einer Reihe von Problemen verbunden, die vorrangig auf dessen Grundbestandteile Wolfram (W) und Kobalt (Co) zurückzuführen sind. Beide werden von der Europäischen Union (EU) als kritische Rohstoffe eingestuft [EUU24, S. 55]. Diese Einstufung kann an zwei Kennzahlen deutlich gemacht werden. Beide Rohstoffe weisen eine hohe Länderkonzentration anhand des Herfindahl-Hirschman-Index (HHI) auf, d. h. die weltweite Rohstoffförderung ist auf wenige Länder verteilt. So liegt der Anteil von China an der weltweiten Wolframförderung bei ca. 85 % [BAR23, S. 74], der Anteil der Demokratischen Republik Kongo an der weltweiten Kobaltförderung bei ca. 69 % [BAR23, S. 58]. Weiterhin bewertet das gewichtete Länderrisiko (GLR) anteilig u. a. die politische Stabilität, Korruption sowie Meinungs-, Presse- und Wahlfreiheit der Länder, in welchen die betrachteten Rohstoffe konzentriert sind [BAR23, S. 12 f.]. Die nachfolgende Abbildung 1 zeigt auf, dass Wolfram und Kobalt auf Basis von HHI und GLR jeweils den höchsten Risikogruppen zuzuordnen sind.

¹ Die hohe Exportquote von 69,7 % spiegelt die hohe Relevanz der Industrie auch außerhalb von Deutschland wieder [VDW24, S. 13].

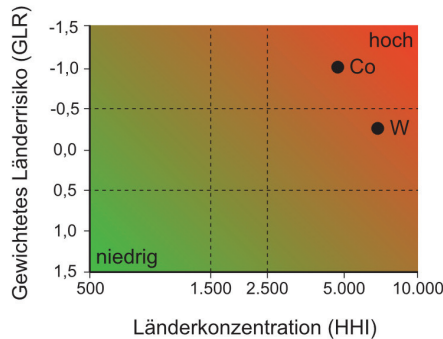


Abbildung 1 Länderrisiko und Länderkonzentration von Wolfram und Kobalt, in Anlehnung an [BAR23, S. 18]

Die grundsätzlich hohen Rohstoffpreise gehen mit einer starken Volatilität der Märkte einher, welche u. a. durch die hohe Länderkonzentration bedingt ist. So bewegten sich die jährlichen Durchschnittspreise für Kobalt seit dem Jahr 2000 in einer Bandbreite von etwa 15.000 USD bis 86.000 USD pro Tonne. Auffällig ist dabei, dass der Kobaltpreis in den Jahren 2000 und 2024 weitgehend vergleichbar war. Auch der Wolframpreis unterlag nach einem starken Anstieg zwischen 2003 und 2006 erheblichen Schwankungen und variierte seither zwischen 148 USD und 358 USD pro Tonne Wolframkonzentrat. Die nachfolgende Abbildung 2 stellt diese Entwicklung grafisch dar.

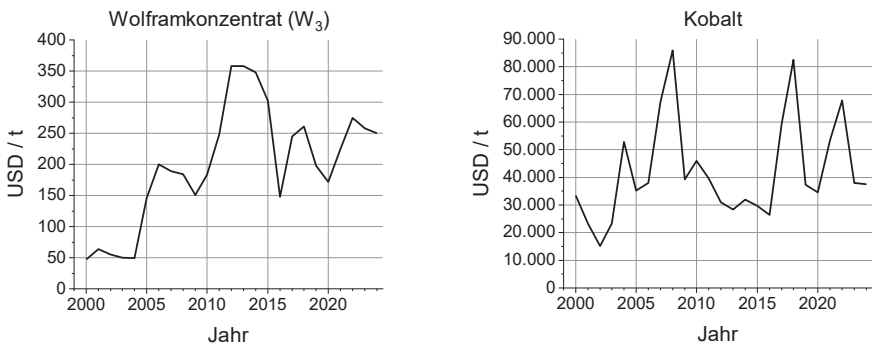


Abbildung 2 Preisentwicklung von Wolframkonzentrat und Kobalt seit dem Jahr 2000, eigene Darstellung in Anlehnung an [USG25, S. 62 f., S. 190 f.]

Neben den geostrategischen und ökonomischen Aspekten ist die Herstellung von Hartmetall auch mit hohen Umweltauswirkungen verbunden. Dies ist insbesondere durch den hohen Energieaufwand für die dafür nötigen hydro- und pulvermetallurgischen Prozesse bedingt [FUR20, S. 1134 f.]. Darüber sind insbesondere beim Abbau von Kobalt auch soziale Aspekte wie Arbeitssicherheit und Kinderarbeit als kritisch zu bewerten [SCH21a, S. 15–17].

Als Substitut für Hartmetalle in der spanenden Fertigung kommen natürliche Gesteine in Betracht. Grundsätzliche Werkstoffeigenschaften wie eine hohe Härte, eine im Vergleich zu metallischen Werkstoffen geringe Dichte [PRE17, S. 71] und chemische Beständigkeit machen Gesteine zum Einsatz als Werk- bzw. Schneidstoff für die Werkzeugherstellung interessant. Darüber hinaus sind Gesteinsvorkommen global vorhanden und verfügbar. Damit stellen sie keine kritischen Rohstoffe dar und sind zudem kostengünstig zu beziehen. Ebenso entfallen beim Einsatz von Natursteinen im Vergleich zum Hartmetall die energieintensiven Prozesse der Hydro-, Pyro- und Pulvermetallurgie, womit diese aus energetischer Sicht auch zu einer ökologisch vorteilhaften Alternative werden. Obwohl Gestein bereits in der Frühzeit des Menschen als Schneidstoff Verwendung fand, zeigen erste wissenschaftliche Untersuchungen, dass Natursteine auch für den Einsatz in modernen Zerspanprozessen grundsätzlich geeignet sein können [DEN22].

1.2 Zielsetzung

Um den in Abschnitt 1.1 beschriebenen geopolitischen, ökonomischen und ökologischen Herausforderungen in Bezug auf den Einsatz von Hartmetall zu begegnen, setzt sich die vorliegende Arbeit zum Ziel, einen Vollmaterialschaftfräser aus einem neuartigen Gesteinsverbundwerkstoff zu entwickeln. Durch den Einsatz eines Verbundwerkstoffs auf Gesteinsmehlbasis, wird die Problematik der inhomogenen und richtungsabhängigen Werkstoffeigenschaften von Natursteinen umgangen, welche sowohl die Herstellung als auch den Einsatz daraus bestehender Werkzeuge erschwert. Als Anwendungsfall wird die spanende Bearbeitung von Kunststoffbauteilen und -halbzeugen gewählt. Aufgrund der im Vergleich zu metallischen Werkstoffen geringeren mechanischen Anforderungen an das eingesetzte Werkzeug, stellt dies ein geeignetes Einsatzfeld zur Erprobung des neu zu entwickelnden Vollmaterialschaftfräsers aus Gesteinsverbundwerkstoff dar.

Die vorliegende Arbeit identifiziert dabei zunächst geeignete Referenzen in Form von Fräs Werkzeugen, Fräsbauteilen und Prozessführungen. Darauf aufbauend setzt die vorliegende Arbeit zwei Schwerpunkte. Zunächst ist dies die Entwicklung einer geeigneten Werkzeuggeometrie, welche speziell an die Eigenschaften des als Werkzeuggrund- und Schneidstoff eingesetzten Gesteinsverbundwerkstoff angepasst wird. Darauf aufbauend erfolgt die experimentelle Erprobung des zu entwickelnden Vollmaterialschaftfräsers aus Gesteinsverbundwerkstoff. Hierbei sollen unterschiedliche Zielgrößen für verschiedene Bearbeitungsoperationen systematisch untersucht werden, um dessen technische Leistungsfähigkeit bestimmen zu können. Abschließend wird eine ökologische Bewertung durchgeführt, um die Umweltauswirkungen des Lebenszyklus des zu entwickelnden Vollmaterialschaftfräsers aus Gesteinsverbundwerkstoff zu quantifizieren.

Ziel ist es, die grundlegende Eignung des Vollmaterialschaftfräsers aus Gesteinsverbundwerkstoff für die spanende Bearbeitung von Kunststoffbauteilen und -halbzeugen nachzuweisen.

Dabei sollen Bearbeitungsoperationen identifiziert werden, bei welchen der Vollmaterialschaftfräser aus Gesteinsverbundwerkstoff vergleichbare Ergebnisse und einzelne funktionelle Vorteile im Vergleich zu konventionellen Hartmetallfräswerkzeugen bieten kann. Die im Rahmen dieser Arbeit angewendeten Vorgehensweisen und gewonnenen Erkenntnisse sollen als Grundlage für weitere Forschungsarbeiten im Themengebiet der Werkstoffsubstitution bei Zerspanwerkzeugen durch unkritische und nachhaltige Materialien dienen.

1.3 Vorgehensweise

Der Aufbau der vorliegenden Arbeit gliedert sich in acht, aufeinander aufbauende Kapitel. Deren technische und methodische Inputs sowie die Ergebnisse werden in Abbildung 3 zusammengefasst.

In Kapitel 2 wird der Stand der Erkenntnisse zu den Themenfeldern beschrieben, welche für den weiteren Verlauf der Arbeit von Bedeutung sind. Dies sind zunächst die Grundlagen zur Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide. Zu diesen zählen die Beschreibung von Bauformen und Geometrieelementen von Schaftfräsern, Vorschub- und Eingriffsgrößen, die Berechnung von Schnittkräften sowie die Betrachtung des dynamischen Werkzeugverhaltens und Ansätze, dieses zu optimieren. Weiterhin werden die Werkstoffeigenschaften gängiger Schneidstoffe beschrieben und auf die Grundlagen von Gesteinswerkstoffen eingegangen. Abschließend werden existierende Ansätze zur Substitution von Werkstoffen im Werkzeugmaschinenbau beleuchtet und die vorliegende Arbeit von diesen abgegrenzt.

Kapitel 3 und 4 dienen der Referenzbildung und Analyse der Einsatzbedingungen von Fräswerkzeugen und Prozessen zur Zerspanung von Kunststoffbauteilen und -Halbzeugen. Basis hierzu bildet eine Marktstudie, im Rahmen derer Hersteller- und Anwenderunternehmen befragt wurden, die in der betreffenden Branche tätig sind. Weiterhin wird anhand realer Fräsbauteile aus der industriellen Praxis eine Referenzbearbeitungsaufgabe als Vergleichsgrundlage für die experimentellen Untersuchungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit definiert. Dies erfolgt anhand des Featureansatzes nach der Norm ISO 14649-10 [ISO04a], wobei die Bearbeitungsoperationen zur Herstellung von geometrischen Elementen analysiert werden.

Kapitel 5 beschreibt die simulative Entwicklung von Werkzeuggeometrien, die an die Eigenschaften des eingesetzten Gesteinsverbundwerkstoffs angepasst sind. Dies erfolgt unter Einsatz der Finite-Elemente-Methode (FEM). Hierzu ist zunächst das benötigte Simulationsmodell aufzubauen. Ein Fokus liegt dabei auf der Charakterisierung des Gesteinsverbundwerkstoffs hinsichtlich der für die Simulation benötigten Werkstoffkennwerte. Die Durchführung der Finite-Elemente-Simulation (FE-Simulation) erfolgt anhand einer statistischen Versuchsplanung, mit welcher die Einflüsse einzelner Elemente der Werkzeuggeometrie bestimmt und diese somit optimal ausgelegt werden sollen.

Die Prozesse zur anschließenden Herstellung von Demonstratorwerkzeugen der zuvor drei definierten Gesteinsfräsergeometrien werden in Kapitel 6 beschrieben. Diese beinhalten die virtuelle Werkzeugerstellung im Rahmen einer Schleifsimulation, die Herstellung der benötigten Rohlinge aus dem Gesteinsverbundwerkstoff und die schleiftechnologische Herstellung der Werkzeuggeometrie.

Kapitel 7 umfasst die experimentelle Erprobung der Demonstratorwerkzeuge und Gegenüberstellung zu konventionellen Hartmetallfräs Werkzeugen. Im Laborumfeld erfolgt diese anhand der entwickelten Referenzbearbeitungsaufgabe, gestuften Versuchsplatten, einfachen Abzeiloperationen sowie einer experimentellen Modalanalyse. Letztere dient der Quantifizierung des dynamischen Werkzeugverhaltens. Für die weiteren Untersuchungen werden die Zielgrößen Werkzeugverschleißerscheinung, erzeugte Oberflächenrauheit und entstehende Prozesskräfte betrachtet. Für das Demonstratorwerkzeug, welches die besten Versuchsergebnisse erzielt, erfolgt darüber hinaus eine Erprobung im industriellen Einsatzumfeld. Neben der spanenden Bearbeitung von Kunststoffbauteilen und -halbzeugen soll hierbei auch spanende Bearbeitung von Aluminiumbauteilen und -halbzeugen betrachtet werden, um das Potential des Vollmaterialschaftfräasers aus Gesteinsverbundwerkstoff für weitere Anwendungsfelder zu untersuchen.

Die Umweltauswirkungen des Vollmaterialschaftfräasers aus Gesteinsverbundwerkstoff werden im Rahmen von Kapitel 8 untersucht. Hierzu wird eine vergleichende Ökobilanzstudie nach den Normen DIN EN ISO 14040 [DIN21a] und DIN EN ISO 14044 [DIN21b] durchgeführt. Das Vorgehen orientiert sich dabei an den vier Phasen zur Durchführung einer Ökobilanz: der Definition der Zielsetzung und des Untersuchungsrahmens, dem Zusammentragen der benötigten In- und Outputdaten in der Sachbilanz, dem Abschätzen der Umweltauswirkungen im Rahmen der Wirkbilanz sowie der Interpretation der Ergebnisse.

Kapitel 9 schließt die vorliegende Arbeit mit einer Zusammenfassung und dem Aufzeigen von weiterführendem Forschungsbedarf ab.

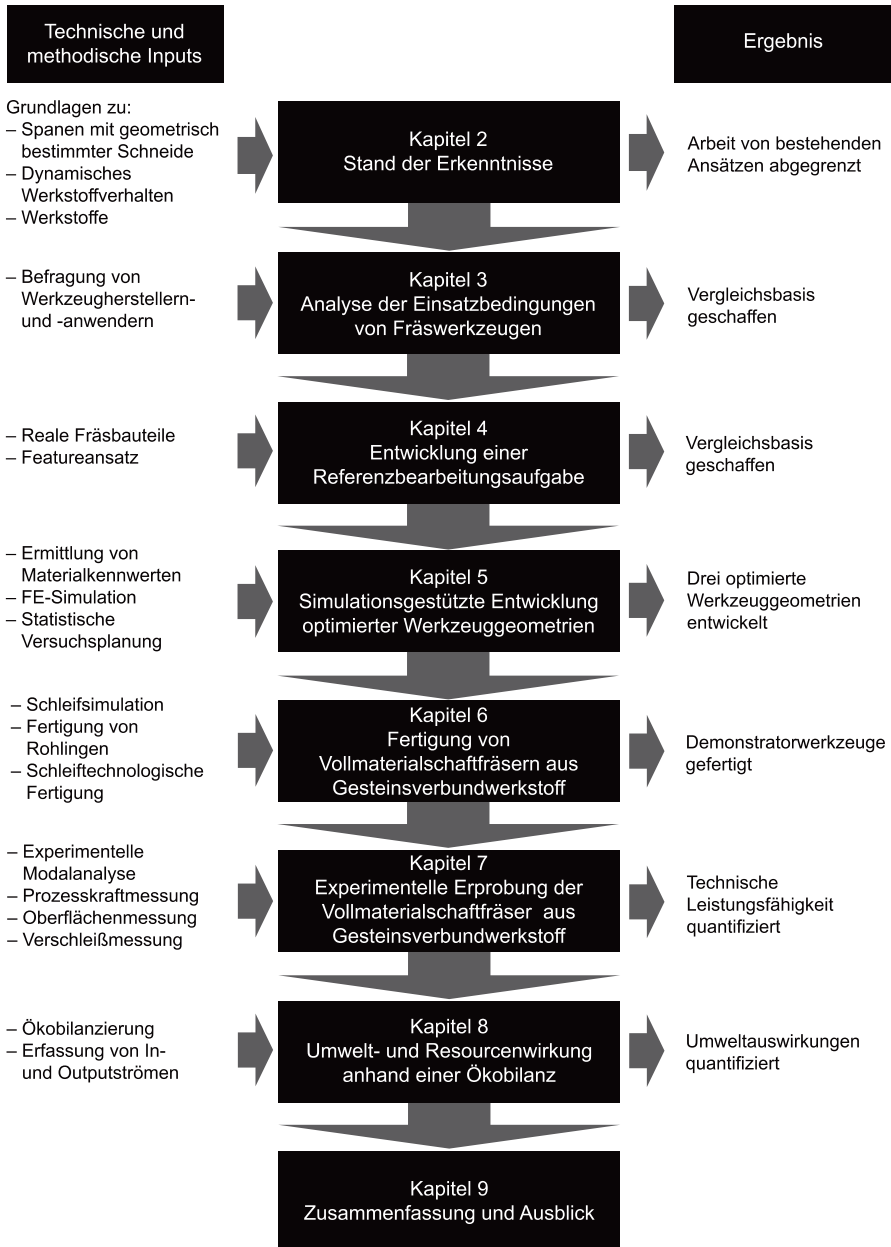


Abbildung 3 Vorgehensweise im Rahmen der vorliegenden Arbeit