

# 1 Einleitung und Motivation

## *Introduction and motivation*

Der Flugzeugbauer AIRBUS prognostiziert für die zivile Luftfahrt nach den Einbrüchen durch die Covid-19 Pandemie ein jährliches Wachstum des Verkehrsaufkommens von 8,4 % bis 2027 und von 3,6 % zwischen 2027 und 2043. Dies führt im entsprechenden Zeitraum zu einem Bedarf von über 42.000 neuen Passagier- und Frachtflugzeugen, um alte Flugzeuge zu ersetzen und die bestehende Flotte aller weltweiten Zivilflugzeuge zu verdoppeln. [AIRB24] Die Umsetzung globaler Klimaschutzziele erfordert eine konsequente Effizienzsteigerung und Emissionsreduktion im Energie- und Luftfahrsektor [IAE21]. Entsprechend den Vorgaben der Europäischen Kommission für die Klimaschutzziele der Luftfahrt soll gegenüber dem Jahr 2000 bis 2050 der Ausstoß von CO<sub>2</sub> um 75 % und der Ausstoß von NO<sub>x</sub> um 90 % reduziert werden [EURO11]. Auf Seiten der Flugzeugindustrie erfordert die Umsetzung der Vorgaben u.a. weitreichende Optimierung der Flugtriebwerke wie z.B. die Reduktion der Größe des Kerntriebwerks sowie die Steigerung der Verbrennungstemperatur [BRÄU15]. Diese Maßnahmen bedingen den vermehrten Einsatz von hochwarmfesten Nickelbasislegierungen, welche den hohen Sicherheitsanforderungen an Luftfahrtwerkstoffe entsprechen.

Nickelbasiswerkstoffe werden vor allem durch zerspanende Fertigungsverfahren bearbeitet. Ihre spezifischen Eigenschaften wie die sehr hohe Warmfestigkeit resultieren in einer schlechten Zerspanbarkeit, die primär durch einen ausgeprägten Werkzeugverschleiß gekennzeichnet ist [KLOC18]. Gleichzeitig müssen übermäßiger und unkontrollierter Verschleiß sowie spontanes Werkzeugversagen vermieden werden, um die Randzonenintegrität der sicherheitskritischen Bauteile nicht zu gefährden [GIER15; SEIM19]. Diese Randbedingungen sowie die kontinuierliche Effizienzsteigerung in der Serienfertigung resultieren in einer steigenden Nachfrage nach Zerspanwerkzeugen und erhöhten Anforderungen an diese. Gleichzeitig kommt es in der Praxis der Zerspanung von Nickelbasiswerkstoffen immer wieder zu ausgeprägten Schwankungen des Werkzeugeinsatzverhaltens, die die Stabilität der Fertigung gefährden.

Werkzeugzeitig sind Schneidstoff und Geometrie eindeutig spezifiziert. Verschiedene Untersuchungen deuten zudem darauf hin, dass die Oberflächen und die Randzonen von Zerspanwerkzeugen einen signifikanten Einfluss auf die Standzeit der Werkzeuge haben können, vgl. u.a. [WEIN96; FRIE02; MALD08; HÜBE12; THEU20; DENK21]. Aufgrund der zeitgleichen Variationen mehrerer Werkzeugmerkmale sind die genauen Zusammenhänge jedoch häufig nicht hinreichend erklärt. Es liegen weiterhin keine spezifischen Erkenntnisse dazu vor, inwieweit die Werkzeugoberflächen- und -randzonenmerkmale das Standvermögen in der Zerspanung von Nickelbasiswerkstoffen bestimmen und wie diese Merkmale durch den Werkzeugschleifprozess und die folgende Schneidkantenpräparation beeinflusst werden.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Erforschung der oben beschriebenen Zusammenhänge im Kontext der Fräsbearbeitung der Nickelbasislegierung Inconel 718 (IN718) und die Entwicklung von Empfehlungen für die Gestaltung der Werkzeugoberflächen- und -randzonen-eigenschaften. Dazu werden zum einen die Auswirkungen von Variationen der Prozessstellgrößen in der Werkzeugherstellung auf die entstehenden Oberflächen- und Randzonen-eigenschaften ermittelt. Ziel hierbei ist es, die Werkzeugmerkmale möglichst in weiten Grenzen möglichst isoliert voneinander einzustellen. Zum anderen erfolgt die Analyse des Standvermögens der Fräswerkzeuge in Abhängigkeit von den erzeugten Merkmalsausprägungen. Die beobachteten Phänomene werden durch ein Erklärungsmodell beschrieben und münden in konkreten Gestaltungsempfehlungen für die Praxis.



## Introduction and Motivation

### *Einleitung und Motivation*

The aircraft manufacturer AIRBUS forecasts an annual growth in air traffic of 8.4 % until 2027 and 3.6 % between 2027 and 2043, following the downturns caused by the COVID-19 pandemic. This growth will result in a demand for over 42,000 new passenger and cargo aircraft during this period to replace aging fleets and double the current global civil aircraft fleet. [AIRB24] Achieving global climate protection goals requires consistent improvements in efficiency and reductions in emissions in both the energy and aviation sectors [IAE21]. According to the European Commission's guidelines for aviation climate protection goals, CO<sub>2</sub> emissions must be reduced by 75 % and NO<sub>x</sub> emissions by 90 % by 2050 compared to the year 2000 [EURO11]. For the aviation industry, meeting these targets necessitates significant optimization of aircraft engines, such as reducing the size of the core engine and increasing combustion temperatures [BRÄU15]. These measures require a greater use of high-temperature-resistant nickel-based alloys, which meet the stringent safety requirements for aviation materials.

Nickel-based materials are primarily machined using cutting processes. Their specific properties, such as very high heat resistance, result in poor machinability, primarily characterized by pronounced tool wear [KLOC18]. At the same time, excessive and uncontrolled wear as well as sudden tool failure must be avoided to ensure the surface integrity of these safety-critical components [GIER15; SEIM19]. These constraints, along with the continuous drive for increased efficiency in serial production, result in growing demand for cutting tools and higher requirements for their performance. Simultaneously, fluctuations in tool performance during the machining of nickel-based materials frequently occur in practice, threatening production stability.

Cutting materials and geometries are generally precisely specified. Various studies also suggest that the surface layers, including surface and subsurface zone, of cutting tools can significantly influence tool life, as indicated by [WEIN96; FRIE02; MALD08; HÜBE12; THEU20; DENK21]. However, due to simultaneous variations in multiple cutting tool characteristics, the exact relationships are often not sufficiently understood. Furthermore, there is no conclusive knowledge about the extent to which tool surface and subsurface properties determine tool performance in the machining of nickel-based alloys or how these properties are affected by the tool grinding and the cutting edge preparation process.

The aim of this work is to explore the relationships described above in the context of milling the nickel-based alloy Inconel 718 (IN718) and to derive recommendations for the design of the surface layer properties of cutting tools. On the one hand, the effects of variations in the process parameters in cutting tool manufacture on the resulting surface and subsurface properties are determined. The aim here is to adjust the cutting tool characteristics as isolated from each other as possible within wide limits. On the other hand, the tool life of the milling tools is analyzed as a function of the generated characteristic embossing. The observed phenomena are described using an explanatory model and result in specific design recommendations for practical application.



## 2 Stand der Technik in Forschung und Industrie

### *State of the art in research and industry*

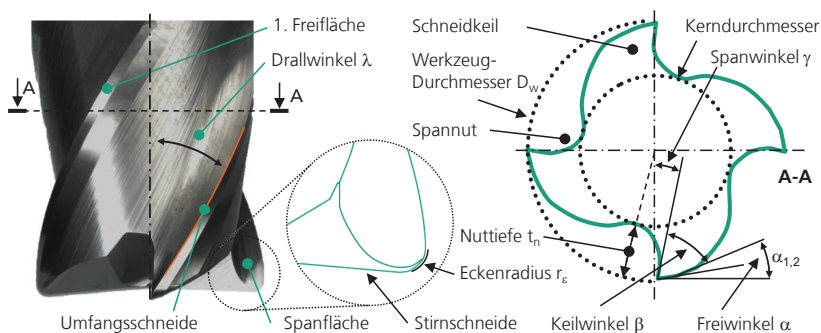
Die Analysen im Stand der Technik fokussieren drei zentrale Bereiche. Nach einer kurzen Vorstellung der Werkzeuggeometrie werden die Prozesskette der Werkzeugherstellung und die dadurch bedingte Beeinflussung der Werkzeugrandzone in Kapitel 2.2 eingeführt. Der dieser Arbeit zu Grunde liegende Anwendungsfall ist das Schlichtfräsen der hochwarmfesten Legierung IN718. In Kapitel 2.3 erfolgt daher, ausgehend von den Werkstoffeigenschaften, die Analyse der wirkenden Belastungen und Beanspruchungen des Werkzeugs sowie des daraus resultierenden Werkzeugverschleißes. In Kapitel 2.4 werden bekannte Auswirkungen der durch die Herstellung erzeugten Werkzeugoberflächen- und -randzoneigenschaften auf das Verschleißverhalten im Einsatz fokussiert.

### 2.1 Werkzeuggeometrie

#### *Cutting tool geometry*

Für die Fräsbearbeitung schwer zugänglicher Kavitäten werden insbesondere Schaftwerkzeuge verwendet. Unter Schaftwerkzeugen werden Zerspanwerkzeuge verstanden, deren Geometrie bestimmte Schneiden während der Materialtrennung rotatorisch bewegen. Nach DIN6582 erfolgt eine Unterteilung in einteilige Vollmaterialwerkzeuge und Verbund- bzw. zusammengesetzte Werkzeuge, bei denen Schneidteil und Schaftkörper getrennt ausgeführt und durch Stoff- oder Kraftschluss fest oder lösbar miteinander verbunden sind [DIN88]. Gegenüber letztgenannten sind einteilige Werkzeuge nicht auf einen minimal herstellbaren Durchmesser beschränkt und in ihrer geometrischen Komplexität weniger limitiert [HÜBE12]. Einteilig ausgeführte Werkzeuge lassen sich zudem wirtschaftlich in kleinen Stückzahlen fertigen, so dass ihre Funktionsmerkmale optimal auf den Einsatzfall angepasst werden können [KÖLL86]. Funktionsmerkmale sind neben den Schneidstoffeigenschaften geometrische Merkmale sowie Eigenschaften der Randzone.

Der Überbegriff der Werkzeuggeometrie umfasst die Gesamtheit der Geometriemerkmale eines Werkzeugs, vgl. [DIN88]. Die Charakterisierung der Geometrie erfolgt u.a. über die nachfolgend dargestellten geometrischen Kenngrößen des Schaftfräasers am Beispiel der Umfangsschneide.



**Abbildung 2.1: Geometriemerkmale des Schaftfräasers**

*Geometric features of the end milling tool*

Der Schneidteil bezeichnet den wirksamen Teil Werkzeugs, an dem sich die Schneidkeile befinden. Diese werden durch die Span- und Freiflächen,  $A_\gamma$  und  $A_\alpha$  gebildet. Die Spannuten mit helixförmigem Verlauf transportieren die Späne und den Kühlschmierstoff. Schafffräswerkzeuge verfügen über Stirn- und Umfangsschneiden. Der Übergang kann je nach Anwendung scharfkantig, mit einer Fase oder mit einem Eckenradius  $r_e$  ausgeführt werden.

In vielen Arbeiten wird zwischen der Makro- und der Mikrogeometrie des Werkzeugs unterschieden. DENKENA und BIERMANN definierten den Übergang zwischen beiden als eine Linie entlang der Spanfläche, an der der effektive Spanwinkel  $\gamma_{\text{eff}}$  vom nominellen Spanwinkel abweicht [DENK14]. Gegenüber der Makrogeometrie umfasst der Begriff Mikrogeometrie die geometrischen Ausprägungen der Schneidkante. Zu ihrer Herstellung kommen unterschiedliche Verfahren zum Einsatz, die neben den mikrogeometrischen Größen der Schneidkante in Kapitel 2.2.3 vorgestellt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird für die Unterscheidung zwischen Makro- und der Mikrogeometrie die o.g. Definition zu Grunde gelegt.

## 2.2 Prozesskette der Werkzeugherstellung

*Process chain of cutting tool manufacturing*

Die Herstellung von Vollhartmetallwerkzeugen erfolgt in einer Vielzahl aufeinanderfolgender Prozessschritte [FRIE02]. Die Eigenschaften des gesinterten Hartmetalls sowie die nachfolgende Schleifbearbeitung und Schneidkantenpräparation beeinflussen maßgeblich das Einsatzverhalten der Werkzeuge. Ausgehend von den funktionsrelevanten Eigenschaften von Hartmetall werden daher das Schleifen und die Schneidkantenpräparation beschrieben sowie die hierdurch bedingten Änderungen der Oberflächen- und Randzoneneigenschaften diskutiert.

### 2.2.1 Eigenschaften von Hartmetall

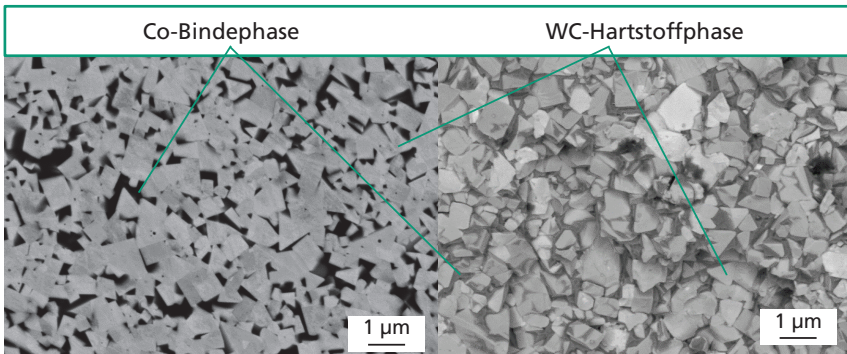
*Properties of cemented carbide*

Hartmetalle sind pulvermetallurgisch hergestellte Verbundwerkstoffe aus zwei oder mehr Phasen: einer vergleichsweise spröden Hartstoffphase und einer duktilen Binderphase. Als Hartstoffe werden Stoffe mit einer Vickers-Härte von über 1000 HV bezeichnet. [SCHE88] Bei der Hartphase handelt es sich im Fall der klassischen Hartmetalle üblicherweise um Wolframkarbid (WC), bei der Binderphase um Kobalt (Co) oder Nickel (Ni) [PRAK14]. Ebenso gibt es WC-Co-Hartmetalle, welche einen Anteil von bis zu über 30 Gew.-% Mischkarbide (TiC, TaC, NbC) aufweisen. Diese zeichnen sich durch verbesserte Hochtemperaturfestigkeit aus. [KOLA92; KLOC08] Cermets bezeichnen eine dritte Gruppe von Hartmetallen mit Titankarbid (TiC) und Titanitrid (TiN) Hartstoffphase und Nickel oder Kobalt als Binderphase [KLOC18].

Hartmetalle spielen seit Ihrer Vorstellung auf der Leipziger Frühjahrsmesse 1927 eine bedeutende Rolle für trennende und umformende Fertigungsverfahren [KOLA07]. Der Anteil des Schneidstoffs Hartmetall am Weltmarkt für Zerspanwerkzeuge lag 2019 bei ca. 53 % [DEDA20]. Die herausragende Bedeutung für viele Anwendungsbereiche wie das Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide resultiert aus der günstigen Eigenschaftskombination von Härte und Zähigkeit [SCHE88; GARC19]. Im Rahmen dieser Arbeit werden WC-Co Hartmetalle betrachtet, die primär für technische Anwendungen zum Einsatz kommen. Im Folgenden wird auf Aufbau, Klassifizierung, Eigenschaften, Herstellung und Anwendung eingegangen.

Abbildung 2.2 zeigt den Gefügeaufbau eines WC-Co Hartmetalls. Charakteristisch ist der große Volumenanteil der hochschmelzenden Hartphase WC. Der WC-Anteil liegt für Zerspanwerkzeuge bei über 80 bis etwa 95 Gew.-% [KAYS19; SAND19]. Das Wolframkarbid ist in eine Matrix aus

duktilen Kobalt eingebettet. Co und WC bilden dabei jeweils ein zusammenhängendes Skelett, wobei sich beide durchdringen [SAIL02; PRAK14]. Üblicherweise liegen die Wolframkarbide in Form von Prismen mit dreieckiger Grundfläche vor [KOLA92; KLOC08]. Die Karbidkorngröße stellt eine wesentliche Eigenschaft des Hartmetalls dar und wirkt sich besonders auf die Härte aus [SCHE88; KAYS19]. DIN EN ISO 4499-2 unterteilt Hartmetalle in Anlehnung an die Definition des Fachverbandes für Pulvermetallurgie anhand ihrer Korngröße  $d_{WC}$  in sieben verschiedene Klassen. Die Klassifizierung beginnt mit nanokristallinen Hartmetallen mit durchschnittlicher Korngröße kleiner  $0,2 \mu\text{m}$  und endet mit der Klasse der extra groben Hartmetalle mit einer durchschnittlichen Korngröße größer  $6 \mu\text{m}$ . [FRIE02; DIN10]



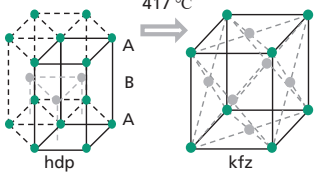
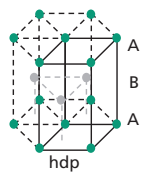
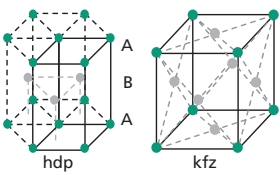
**Abbildung 2.2:** Gefüge eines WC-Co Hartmetalls (links: Querschliff, rechts: Bruchfläche)  
*Microstructure of a WC-Co cemented carbide (left: cross-section cut, right: fracture surface)*

Die Kontiguität  $C_{WC}$  beschreibt hinsichtlich des Gefüges den Grad der Skelettbildung des Hartstoffs. Die Kontiguität resultiert aus dem Verhältnis der Karbid-Karbid-Korngrenzflächen zur gesamten Korngrenzfläche [GURL58]. Zur Charakterisierung der Bindermetallphase dient die mittlere freie Weglänge  $\lambda_{Co}$ , welche die mittlere Dicke der Kobaltschichten zwischen zwei Karbidkörnern angibt [WIRT18]. Die mittlere freie Weglänge, die Kontiguität und die WC-Korngröße haben maßgeblichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften von Hartmetallen [KELL10; KAYS19]. Die beiden zuerst genannten Größen ergeben sich aus der WC-Korngröße und dem Binderanteil.

Die **Herstellung von Hartmetall** ist ein pulvermetallurgischer Prozess [SCHE88]. Nach der Pulveraufbereitung und dem Pressen des sogenannten Grünlings folgt das Sintern als wesentlicher Prozessschritt. Das Sintern dient dazu, Poren zu schließen und das Hartmetall durch Diffusions- und Platzwechselmechanismen zu verdichten. Der Sinterprozess bzw. das Flüssigphasensintern erfolgt oberhalb der eutektischen Temperatur von  $1.280 \text{ }^\circ\text{C}$  und unter Vakuum. Die flüssige Binderphase benetzt die Wolframkarbidkörner. [BERT07] Die ausgezeichnete Benetzbarkeit des Wolframkarbids mit Kobalt und die starken Adhäsionskräfte zwischen Hart- und Binderphase sind eine Ursache für die guten mechanischen Eigenschaften des Hartmetalls [SCHE88]. Die Löslichkeit von Wolframkarbid als atomarer Bestandteil im Kobalt ist hierfür eine zentrale Voraussetzung [KAYS19]. Grundlage für die Einstellung eines reinen Zweiphasenwerkstoffs WC-Co ist ein Atomverhältnis von Wolfram zu Kohlenstoff von ungefähr eins. Ist zu wenig Kohlenstoff vorhanden, werden WC-Co Doppelkarbide ( $\eta$ -Phasen) ausgeschieden. Diese sind spröde und entziehen dem Hartmetall einen Teil des Binders. Im Fall zu hoher Kohlenstoffanteile kann Graphit ausgeschieden werden. [SCHE88; GARC19; KAYS19] Während des Sinterns tritt ein starker Volumenschwund

auf, der je nach Porenvolumen bei über 40 % liegen kann. Nach dem Sintern liegt üblicherweise keine offene Porosität mehr vor, eine innere Restporosität kann aber nicht ausgeschlossen werden. Diese wirkt sich in jedem Fall negativ auf die späteren Eigenschaften aus. Häufig wird nach dem Sintern durch heißisostatisches Pressen (HIP) bei Temperaturen leicht unterhalb der Sinter-temperatur und Drücken von ca. 1.000 bar Hartmetall bis in die Poren hinein plastisch verformt, um die Festigkeitseigenschaften zu verbessern. [SCHE88]

**Relevante Eigenschaften** von Hartmetallen sind insbesondere die Härte, die Biegebruchfestigkeit  $\sigma_{BB}$  und die Bruchzähigkeit  $K_{IC}$ . Übliche Werte der Härte von WC-Co Hartmetallen liegen zwischen 650 und 2.300 HV, übliche Werte der Bruchzähigkeit zwischen 7 und 30  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  [GARC19]. Mit steigendem Kobaltgehalt sinkt die Härte, gleichzeitig steigen die Bruchzähigkeit und die Bruchfestigkeit [BÖHL02; KLOC08]. Je feiner die Korngröße, umso höher ist dabei das Niveau der Härte. [GARC19; SAND19]. Kleinere Hartstoffpartikel führen zu einer größeren Oberfläche dieser Hartphasen und bei gleichbleibendem Bindergehalt zu dünneren Kobaltzwischen-schichten [BERT07]. Für Feinst- und Ultrafeinkornhartmetall mit einer Korngröße von unter 1  $\mu\text{m}$  tritt mit zunehmender Kornfeinheit gleichzeitig ein Anstieg der Härte als auch der Biegefestigkeit auf [KOLA92]. Mit zunehmendem Mischkarbidanteil sinkt die Bruchzähigkeit [KLOC18]. Die Auswahl des Hartmetalls stellt für den jeweiligen Anwendungsfall einen Kompromiss zwischen Härte einerseits sowie Bruchfestigkeit und -zähigkeit andererseits dar. Die Eigenschaften der einzelnen Phasen unterscheiden sich deutlich und sind Abbildung 2.3 vergleichend gegenübergestellt.

	Kobalt	Wolframkarbid	WC-Co Hartmetall
			
Dichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	8,9	15,7	9 - 15
Vickershärte / HV	1043	2600	800 - 2500
E-Modul / $\text{kN}/\text{mm}^2$	209	696	400 - 680
Wärmeausdehnungs-koeffizient / $10^{-6}/\text{K}$	13,36	5,2	5 - 7
Krit. Risszähigkeit / $\text{MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$	-	-	5 - 27

**Abbildung 2.3: Kristallstrukturen und Eigenschaften von Wolframkarbid, Kobalt und WC-Co Hartmetallen [EXNE79; SCHE88; GROO10]**

*Crystal structures and properties of tungsten carbide, cobalt and cemented carbides (WC-Co)*

Wolframkarbid zeichnet sich durch metallähnliche Eigenschaften aus, die auf eine Mischform metallischer und kovalenter Bindung zurückzuführen ist [EXNE79; KAYS19]. Wolframkarbid kristallisiert in der hexagonal dichtest gepackten (hdp) Kristallstruktur [SCHE88]. Die Vickershärte erreicht Werte von bis zu 2.600 HV. Eine herausragende Eigenschaft von WC ist dessen plastisches Defor-

mationsvermögen. Versetzungsbewegungen finden vor allem entlang der insgesamt fünf Gleitsysteme statt [KAYS19]. WIRTZ konnte in seinen Untersuchungen zum Einkornritzen von WC-Co Hartmetalle diese Versetzungen durch Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) in der Randzone der Ritzspur sichtbar machen [WIRT18]. LIU ET AL. untersuchten das plastische Deformationsvermögen von WC in Ultrafeinstkornhartmetall und in extra grobem Hartmetall. Mit zunehmender Korngröße erfolgt ein wachsender Anteil der Deformation des Hartmetalls in der WC-Hartphase. Größere WC-Körner wiesen eine deutlich höhere Dichte von Versetzungen und Stapelfehlern auf, was auf die höhere Anzahl aktiver Gleitsysteme zurückgeführt wurde. [LIU18]

Reines Kobalt liegt bei Raumtemperatur in der hexagonalen Modifikation (hdp) vor. Oberhalb von 417 °C wandelt es in ein kubisch flächenzentriertes Kristallgitter um. Die im Kobalt gelösten Wolfram- und Kohlenstoffatome stabilisieren jedoch das kfz-Gitter bis zur Raumtemperatur. [ROEB84] Im Kobalt mit kfz-Phase liegen insgesamt 12 Gleitsysteme vor, die das gute plastische Verformungsvermögen der Binderphase begründen [KAYS19].

Für das Einsatzverhalten ist die Abhängigkeit der Eigenschaften von den Einsatztemperaturen relevant. OTTERSBUCH untersuchte die Veränderung von Härte und Bruchzähigkeit eines WC-11,8Co mit zunehmender Temperatur mit Hilfe der Methode nach Palmqvist. Er stellte zwischen Raumtemperatur und 600 °C eine Reduktion der Härte um ca. 30 % bei gleichzeitigem Anstieg der Bruchzähigkeit von ca. 18 auf 28 MPa·m<sup>1/2</sup> fest. Bei weiterer Erhöhung der Temperatur sank die Härte signifikant. [OTTE18] Ähnliche Untersuchungen führte WIRTZ durch, wobei er die Methode von Shetty nutzte. Ein Abfall der Härte bei 620 °C betrug für ein WC-12Co Hartmetall ebenfalls ca. 35 %. Im Gegensatz zu den Arbeiten von OTTERSBUCH nahmen die Werte von  $K_{IC}$  in seinen Untersuchungen leicht ab. [WIRT18] Dies kann zum einen auf die Untersuchungsmethode zurückzuführen sein, zum anderen in den unterschiedlichen Hartmetallen ( $K_{IC}$  bei Raumtemperatur lag bei ca. 9 – 10 MPa·m<sup>1/2</sup>) begründet liegen.

## 2.2.2 Schleifbearbeitung von Vollhartmetallwerkzeugen

*Grinding of solid cemented carbide cutting tools*

Die Analyse des Schleifens von geometrisch komplexen Schaftwerkzeugen und der damit verbundenen Schleifoperationen war bisher nur in limitiertem Umfang Gegenstand in wissenschaftlichen Arbeiten, vgl. [SCHN99; WEIN06; HÜBE12; HEYM15; SCHR18; THEU20; DENK21]. Bei der Herstellung von Vollhartmetallwerkzeugen erfolgt die Einbringung des Schneidteils aufgrund der erforderlichen Form- und Maßgenauigkeit und der gewünschten Oberflächengüten von  $R_a < 0,8 \mu\text{m}$  bevorzugt durch das Schleifen [MALD08; HÜBE12; WIRT18]. Bedingt durch die hohe Härte von Hartmetall kommen ausschließlich Diamantschleifscheiben zum Einsatz [FRIE02; HÜBE12]. Gegenüber konventionellen Flach- oder Rundschleifprozessen zeichnet sich das Werkzeugschleifen durch eine komplexe Kinematik aus, die im folgenden Teil erläutert wird.

### Kinematik des Werkzeugschleifens

Das Werkzeugschleifen erfolgt aufgrund der komplexen Kinematik auf speziellen Schleifmaschinen mit fünf oder mehr Achsen und setzt sich aus mehreren Einzelschritten zusammen, die nacheinander die einzelnen Funktionselemente am Werkzeuge erzeugen, vgl. [SCHR18]. Für rotationsymmetrische Werkzeuge sind dies vier wesentliche Schritte. Der Rohling wird nach dem Sintern spitzenlos-außenrund geschliffen (Schritt 1), wodurch in vielen Fällen die Geometrie und die Oberfläche des für die Spannung benötigten Schaftes eingestellt werden [FRIE02]. Sollen Stufen- oder Mikrowerkzeuge hergestellt werden, schließt sich ein Außenrundschleifprozess zur Fertigung