



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Institut für
Fertigungstechnik und
Hochleistungslasertechnik



Diplomarbeit

Untersuchung der Innenkühlung von Diamantwerkzeugen für die Zerspanung von Eisenbasis-Werkstoffen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Master of Science unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Friedrich Bleicher

(Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik)

und der Betreuung von

Projektass. Dipl.-Ing. Manuel Reiter

(Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Ismail Hakki Yavuz

Matrikelnummer 01226183 (Kennzahl 066 482)

Gußriegelstraße 51-59/18/8

1100 Wien

Wien, im März 2019

Ismail Hakki Yavuz

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und, dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im März 2019

Ismail Hakki Yavuz

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei denjenigen bedanken, die mich im Rahmen dieser Diplomarbeit unterstützt haben.

Ganz besonders geht dieser Dank an Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Friedrich Bleicher, der mir die Durchführung dieser interessanten Arbeit ermöglicht hat und mir damit half, mich im wissenschaftlichen Bereich der Fertigungstechnik über meine Grenzen hinaus zu entwickeln. Vielen Dank, dass Sie mir die Möglichkeit gegeben haben, bei Ihnen forschen und arbeiten zu dürfen.

Meinem Betreuer Projektass. Dipl.-Ing. Manuel Reiter danke ich für die fortwährende Unterstützung. Seine Anleitung und die Ratschläge zu der Thematik, als auch die konstruktive Kritik verhalfen mir zu einer gut durchdachten Herangehensweise und Bewältigung der Aufgabenstellung. Vielen Dank für die Zeit und Mühen, die du in meine Arbeit investiert hast.

Einen Dank möchte ich auch an meine lieben Eltern Keziban und Mustafa Yavuz aussprechen, die mich nicht nur während der Schulzeit, sondern auch während des Studiums so herzlich unterstützt haben, ihre erbrachten Leistungen sind für mich unbezahlbar. Ebenfalls möchte ich mich bei meiner lieben Frau Feride Yavuz bedanken, die mir auch an schwierigen Tagen zur Seite stand und mir die notwendige Kraft und Motivation für die Absolvierung meines Studiums gab. Zu guter Letzt bedanke ich mich bei meiner Schwester Sümeyye Yavuz, meinen Brüdern Yunus und Yakup Yavuz für die unvergessliche Kindheit sowie die noch auf uns wartende Zukunft.

Kurzfassung

Die Anforderungen der Industrie an Zerspanungswerkzeuge nehmen durch den Einsatz neuer Werkstoffe und der Forderung nach kürzeren Bearbeitungszeiten immer mehr zu. Um diesen Ansprüchen, beispielsweise in der Serienfertigung von Automotive-Unternehmen, gerecht werden zu können, müssen Zerspanungswerkzeuge dementsprechend hochwertig ausgeführt und ständig weiterentwickelt werden.

Ein Schneidwerkstoff, der hervorragende Vorteile hinsichtlich Stabilität und Verschleißfestigkeit mit sich bringt, und ein großes Potential für zukünftige Entwicklungen von Zerspanungswerkzeugen besitzt, ist der Diamant. Es ist zurzeit das härteste bekannte Element und wird für die Zerspanung von NE-Metallen und Nichtmetallen eingesetzt. Der aktuell noch größte Nachteil von Diamant ist die Einschränkung seines Einsatzgebietes. Die Zerspanung von Eisen-Kohlenstoff-Legierungen mit Diamantwerkzeugen ist aufgrund von Diffusionsvorgängen, die ab einer Temperatur von 700°C auftreten, nur bedingt möglich.

Am *Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik der Technischen Universität Wien* gibt bzw. gab es bereits einige Forschungsarbeiten, die sich mit der Kühlung von verschiedenen Ausführungen von Wendeschneidplatten beschäftigen. Mithilfe eines erodierten, internen Kühlkanals in die Wendeschneidplatte konnten auch bereits erste Erfolge in der Bearbeitung von Eisen-Kohlenstoff-Legierungen mit PKD (polykristalliner Diamant) -Werkstoffen erzielt werden.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung einer innovativen Kühlungsmethode, bei der die Drehbearbeitung von Eisen-Kohlenstoff-Legierungen unter Verwendung von PKD-Wendeschneidplatten ermöglicht werden soll. Diese innovative Kühlungsmethode setzt sich aus der Kombination einer internen Kühlung (IK) und einer externen Minimalmengenschmierung (MMS) zusammen.

Unter Zuhilfenahme des Simulationsprogramms *ANSYS* wurde der Kühlkanal für die Innenkühlung sowohl mechanisch als auch strömungstechnisch optimiert und mittels des Verfahrens des Senkerodierens in die Wendeschneidplatte eingearbeitet. Ebenfalls musste der Drehhalter mit geeigneten Zu- und Abführbohrungen für den Kühlschmierstoff versehen werden.

Neben verschiedenen PKD-Wendeschneidplatten wurden zudem diverse CBN-Wendeschneidplatten mit der eben beschriebenen Kühlungsmethode erprobt. Durch grundlegende Schnittversuche an einem Bearbeitungszentrum (BAZ) wurden die ermittelten Versuchsergebnisse analysiert und miteinander verglichen.

Abstract

The requirements for modern cutting tools in the field of production engineering is constantly rising, due to more efficient processing times and the development of novel material combinations. In order to meet these industrial requirements, cutting tools need to be refined and improved constantly.

One of the most advantageous cutting material, which improvable benefits are optimal for the utilization of cutting tools, is diamond. Due to its outstanding characteristic in hardness, its use in the modern industry is indispensable. Diamond is often applied in the machining of non-ferrous metal and nonmetal material. A serious disadvantage of diamond is the limited field of application, as the machining of an iron-carbon alloy is just conditionally possible because of diffusion processes that occur above 700°C.

The *Institute for Production Engineering and Laser Technology* of the *Vienna University of Technology* has already developed a technique for the cooling of various types of cutting inserts. By implementation of a cooling channel by electric discharge machining (EDM), initial successes could have been made in the machining of iron-carbon alloys with PCD (polycrystalline diamond) -tools.

The present master thesis is focused on the development of an innovative cooling system to enable the machining (turning, in particular) of iron-carbon alloys by the use of PCD-inserts. This innovative cooling system is made up by the combination of internal cooling with cutting fluid and an external minimum lubrication.

The flow-optimized cooling channel for the internal cooling has been assessed, considering mechanical as well as fluid mechanical aspects, by using the simulation program *ANSYS*. Furthermore, the tool holder had to be modified with bore holes for the feed and discharge system of the internal cutting fluid.

Besides the PCD-inserts, the explained cooling system has also been tested on CBN-inserts, to have comparable results between the different tool materials. The results ruling from various experimental cutting tests have been analyzed and evaluated.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Zerspanungstechnische Grundlagen.....	2
2.1	Schneidwerkzeuge	2
2.1.1	Bearbeitungsverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide	2
2.1.2	Schneidengeometrie	3
2.1.3	Kräfte und Geschwindigkeiten an der Schneide	6
2.1.4	Berechnung der Schnittkraft und der Schnittleistung.....	8
2.1.5	Spanbildung, Spanarten und Spanformen.....	11
2.1.6	Verschleißformen an der Schneide.....	15
2.1.7	Energieumsetzung und Temperatur an der Schneide	18
2.2	Schneidstoffe.....	18
2.2.1	Einteilung der Schneidstoffe	19
2.2.2	Hartmetall.....	20
2.2.3	CBN (kubisch kristallines Bornitrid).....	21
2.2.4	PKD (polykristalliner Diamant)	22
2.3	PKD-Wendeschnidplatten	23
2.3.1	Aufbau und Herstellung	23
2.3.2	Bearbeitung von Eisen-Kohlenstoff-Legierungen	24
2.3.3	Vorteile/Nachteile im Einsatz	26
2.4	Kühlschmierung.....	27
2.4.1	Kühlschmierstoffe	27
2.4.2	Überflutungskühlung	28
2.4.3	Minimalmengenschmierung (MMS).....	29
2.5	Optische Messverfahren zur Werkzeugbeurteilung.....	31
2.5.1	Lichtmikroskopie	31
2.5.2	Fokusvariation.....	32
3	Zielsetzung	34
4	Konstruktive Auslegung.....	35
4.1	Interne Kühlung der Wendeschnidplatte	35
4.2	Kombination aus interner Kühlung und externer Minimalmengenschmierung	37

4.3	Finale Geometrie des internen Kühlkanals	42
5	Modellbasierte Simulationen	46
5.1	Finite-Elemente-Methode – FEM	46
5.2	Simulationen mit ANSYS	48
5.2.1	Berechnung der erforderlichen Daten	49
5.2.2	Simulationsparameter	51
5.3	Simulationsergebnisse	51
5.3.1	Mechanische Beanspruchung der Wendeschneidplatte	51
5.3.2	Thermische Beanspruchung der Wendeschneidplatte mit interner Kühlung	55
6	Experimentelle Untersuchung	59
6.1	Verwendete Werkzeuge und Betriebsmittel	59
6.1.1	Sorten der CBN/PKD-Wendeschneidplatte	59
6.1.2	Eigenschaften der MMS-Sorten	67
6.1.3	Eigenschaften des verwendeten Kühlschmierstoffes	67
6.2	Vorbereitung der Wendeschneidplatten	68
6.3	Versuchsaufbau	70
6.4	Versuchsdurchführung	73
7	Auswertung der Versuchsergebnisse	76
7.1	Versuchsergebnisse für CBN	77
7.1.1	Auswertung – CCGW09T308-D-15S-2MC	77
7.1.2	Auswertung – CCGW09T308-A-15EW	79
7.1.3	Auswertung – CCGW09T308-A-15S-2MC	81
7.1.4	Fazit der CBN-Versuchsergebnisse	83
7.2	Versuchsergebnisse für PKD	85
7.2.1	Auswertung – CCGW09T308-PDC-CU-S	85
7.2.2	Auswertung – CCGW09T304-PDC-CU-S	88
7.2.3	Auswertung – CCGW09T308-PDC	92
7.2.4	Auswertung – CCGT09T308-PDC-S-CB2	95
7.2.5	Fazit der PKD-Versuchsergebnisse	97
8	Zusammenfassung und Ausblick	100
9	Anhang – Maschinen und Geräte	102
10	Literaturverzeichnis	106

11	Abbildungsverzeichnis.....	108
12	Formelverzeichnis	112
13	Tabellenverzeichnis.....	113
14	Abkürzungsverzeichnis.....	114

1 Einleitung

In der Zerspanungstechnik ist es das übergeordnete Ziel, geometrisch definierte Werkstücke unter Einhaltung von Maßtoleranzen und Oberflächenrauheiten mit Werkzeugen, die einen möglichst geringen Verschleiß und somit eine hohe Standzeit aufweisen, kostengünstig und reproduzierbar herzustellen. Um diesen komplexen Anforderungen beim Zerspanen gerecht zu werden, ist die Auswahl des passenden Schneidwerkstoffes von größter Bedeutung.

Polykristalliner Diamant (PKD), welcher großes Potential und immer größer werdende Beachtung als Schneidwerkstoff besitzt, kann nur bedingt für die Zerspanung von Eisen-Kohlenstoff-Legierungen eingesetzt werden. Durch die in der Kontaktzone zwischen Werkstück und Werkzeug auftretenden hohen Temperaturen bei der Zerspanung wandelt sich der Diamant ab einem Schwellwert von etwa 700°C in Graphit um. Aufgrund der hohen Affinität zwischen dem Eisen und dem Kohlenstoff diffundiert (wandert) ab der besagten Temperatur der Kohlenstoff im Graphit über die Kontaktzone in das Werkstück (Eisen-Kohlenstoff-Legierung). Der entstehende Verschleiß am Werkzeug wird auch als Diffusionsverschleiß bezeichnet.

Um den Einsatz von Diamantwerkzeugen für die Zerspanung von Eisen-Kohlenstoff-Legierungen möglich und wirtschaftlich rentabel zu machen, wird im Zuge dieser Diplomarbeit eine kombinierte Kühlmethode entwickelt.

Im Zuge dieser Arbeit soll zudem zwischen unterschiedlichen PKD- und CBN-Sorten, und unter Anwendung verschiedener Kühlmethoden, ein Vergleich hinsichtlich der Verschleißentwicklung der Schneidkante des Werkzeuges angestellt werden.

Die wesentlichen inhaltlichen Schritte der Diplomarbeit sind:

- Umsetzung der innovativen Kühlmethode: Design, simulatorische Evaluierung und das spätere Einbringen des internen Kühlkanals in die Wendeschneidplatte mittels Senkerodieren; entsprechende Adaptierung des Drehhalters, und Kombination mit der externen Zuführung der Minimalmengenschmierung.
- Durchführung und Auswertung der experimentellen Untersuchung von drei unterschiedlichen Kühlungsvarianten an zwei verschiedenen Schneidwerkstoffen (PKD, CBN) mit variierenden Gefüge-/Beschichtungs-/Schneidkantenausführungen.

2 Zerspanungstechnische Grundlagen

Die Fertigungstechnik ist ein sehr breitgefächertes Gebiet, welches sich in sechs Hauptgruppen einteilen lässt. In diesem Kapitel wird daraus nur jener grundlegende Bereich wiedergegeben, der für diese Diplomarbeit relevant ist. Die Grundlagen der Hauptgruppe „Trennen“ laut DIN 8589-0, und hier speziell das Spanen mit geometrisch bestimmter Schneidenform, sind die wesentlichen Eckpfeiler für diese Diplomarbeit.

Mithilfe der bereits niedergeschriebenen, theoretischen Erkenntnisse aus der Literatur wird die Problemstellung näher erläutert, und darauf aufbauend eine möglichst optimale Lösungsfindung angestrebt. Die folgenden Unterkapitel behandeln die wichtigsten Grundlagenthemen, die bei der praktischen Abhandlung unbedingt berücksichtigt werden müssen.

2.1 Schneidwerkzeuge

In der Zerspanungstechnik werden für die Bearbeitung von Werkstoffen entsprechende Werkzeuge benötigt, über die der Span mechanisch abgetrennt und somit die gewünschte Form und Oberfläche des bearbeiteten Bauteiles erreicht wird. Eine grundsätzliche Trennung der Werkzeuge erfolgt über die geometrische Bestimmbarkeit: Es wird zwischen Spanen mit geometrisch bestimmter und Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneidenform unterschieden.

2.1.1 Bearbeitungsverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide

Die Gliederung von Schneidwerkzeugen erfolgt über die Unterteilung in sieben Bearbeitungsverfahren (*Abbildung 2.1*). Die Differenzierung der Schneidwerkzeuge untereinander kann über bestimmte Merkmale, wie beispielsweise ihre Geometrie oder Anwendung, erfolgen.

Für die vorliegende Abschlussarbeit wurde das Hauptaugenmerk besonders auf das Bearbeitungsverfahren des Drehens und dessen Schneidwerkzeuge gelegt.

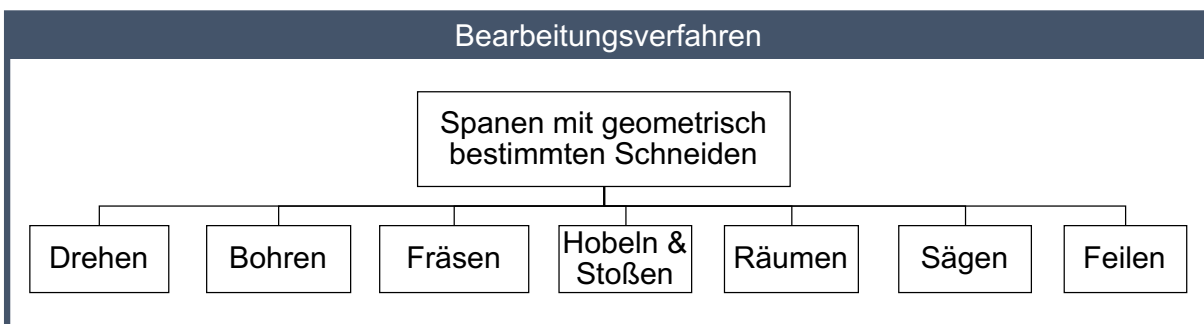


Abbildung 2.1: Unterteilung der Bearbeitungsverfahren der Zerspanung mit geometrisch bestimmten Schneiden basierend auf DIN 8589-0 [1,2]

2.1.2 Schneidengeometrie

Das Zerspanen von Werkstoffen erfolgt durch den in seiner Form eindeutig geometrisch bestimmten Schneidkeil. Aufgrund der übersichtlicheren Darstellung von Winkeln und Flächen am Schneidkeil wird ein Drehwerkzeug als Beispiel herangezogen. Die in *Abbildung 2.2* dargestellten Bezeichnungen finden ebenso bei Wendeschneidplatten Anwendung [1,2]:

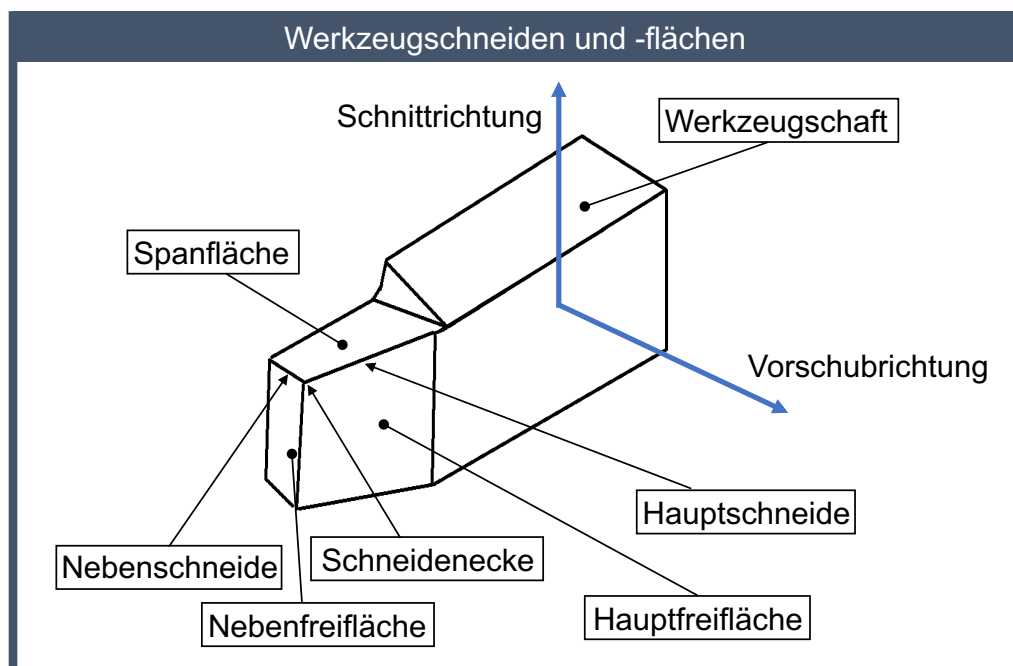


Abbildung 2.2: Schneiden und Flächen am Schneidwerkzeug, in Anlehnung an [2]

- Freiflächen: sind den entstehenden Schnittflächen zugekehrt.
- Spanfläche: über diese Fläche läuft der Span ab.
- Hauptschneide: der Schneidkeil zeigt in Vorschubrichtung.
- Nebenschneide: der Schneidkeil zeigt nicht in Vorschubrichtung.
- Schneidenecke: an dieser Ecke treffen sich die Hauptschneide und die Nebenschneide mit gemeinsamer Spanfläche.

Um Ort, Lage und Bewegungsrichtung eines Schneidkeils eindeutig zu bestimmen, werden Bezugssysteme verwendet, in denen charakteristische Ebenen definiert sind. Die beiden Bezugssysteme, welche in DIN 6581 genormt sind, werden als Werkzeug- und Wirkbezugssystem bezeichnet (siehe *Abbildung 2.3*) [3].

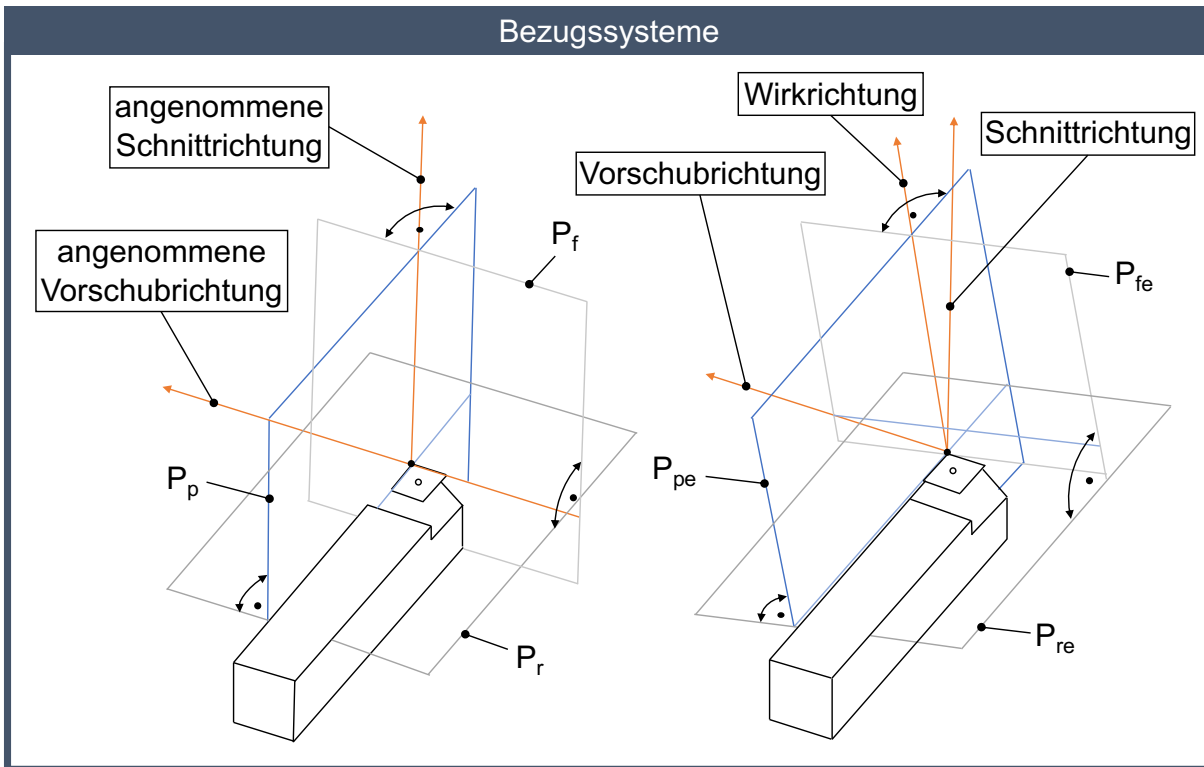


Abbildung 2.3: Werkzeug-Bezugssystem (links) und Wirk-Bezugssystem (rechts), in Anlehnung an [3]

Das Werkzeug-Bezugssystem ist das System, dessen Bezugsebene zur angenommenen Schnitttrichtung orthogonal ausgerichtet ist. Die Bezugsebene des Wirk-Bezugssystems ist hingegen orthogonal zur Wirktrichtung ausgerichtet. Beide Bezugssysteme stimmen dann über ein, wenn die Schnitttrichtung der Wirktrichtung entspricht [3]. Die *Abbildung 2.4* stellt eine weitere Darstellung des Werkzeug-Bezugssystems dar, um alle vorkommenden Ebenen wiederzugeben.

Zunächst werden die Ebenen im Werkzeug-Bezugssystem erläutert. Dazu können die aufgezählten Ebenen in den *Abbildungen 2.3 bis 2.4* abgelesen werden [3]:

- P_r : ist die Werkzeug-Bezugsebene: die Grundebene, auf der alle anderen Ebenen aufbauen.
- P_s : die Werkzeug-Schneidenebene. Sie verläuft tangential zur Schneide und senkrecht zur Werkzeug-Bezugsebene P_r .
- P_o : die Werkzeug-Orthogonalebene. Sie liegt senkrecht zur Werkzeug-Bezugsebene P_r und senkrecht zur Werkzeug-Schneidenebene P_s .
- P_f : die angenommene Arbeitsebene. Sie liegt senkrecht zur Werkzeug-Bezugsebene P_r und parallel zur angenommenen Vorschubrichtung.
- P_p : die Werkzeug-Rückebene. Sie steht senkrecht auf der Werkzeug-Bezugsebene P_r und senkrecht auf der angenommenen Arbeitsebene P_f .

- P_n : die Werkzeug-Schneidennormalebene. Sie liegt senkrecht zur Schneide und ist identisch mit der Wirk-Schneidennormalebene P_{ne} , da sie nicht an der Werkzeug-Bezugsebene, sondern an der Hauptschneide ausgerichtet ist.

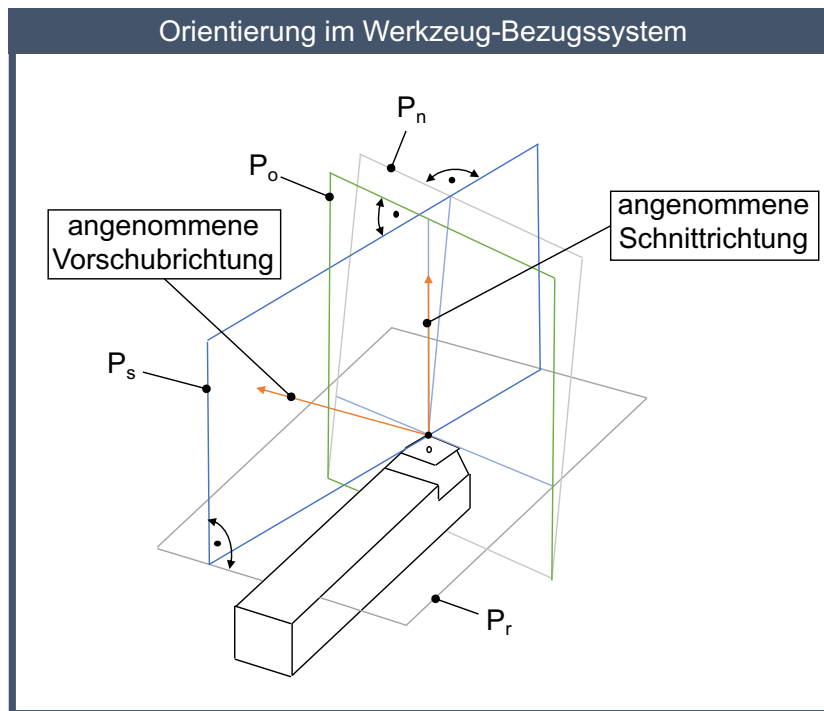


Abbildung 2.4: Darstellung weiterer Ebenen im Werkzeug-Bezugssystem, in Anlehnung an [3]

Das Wirk-Bezugssystem ist gegenüber dem Werkzeug-Bezugssystem um den Wirkrichtungswinkel η gedreht. Im Wirk-Bezugssystem werden die gleichen Indizes wie im Werkzeug-Bezugssystem verwendet; ihnen folgt jedoch ein (e), das für „Wirk-“ steht.

Die Werkzeugwinkel dienen zur Festlegung der Form des Werkzeuges. Sie werden bei der Instandsetzung und der Herstellung des Werkzeuges berücksichtigt. Die Winkel in der sogenannten Werkzeug-Orthogonalebene, die senkrecht zur Werkzeug-Schneidenebene steht, werden wie folgt bezeichnet (siehe *Abbildung 2.5*) [3,4]:

- Freiwinkel α : Winkel zwischen der Freifläche und der Schneidenebene.
- Keilwinkel β : Winkel zwischen der Freifläche und der Spanfläche.
- Spanwinkel γ : Winkel zwischen Spanfläche und der Bezugsebene.

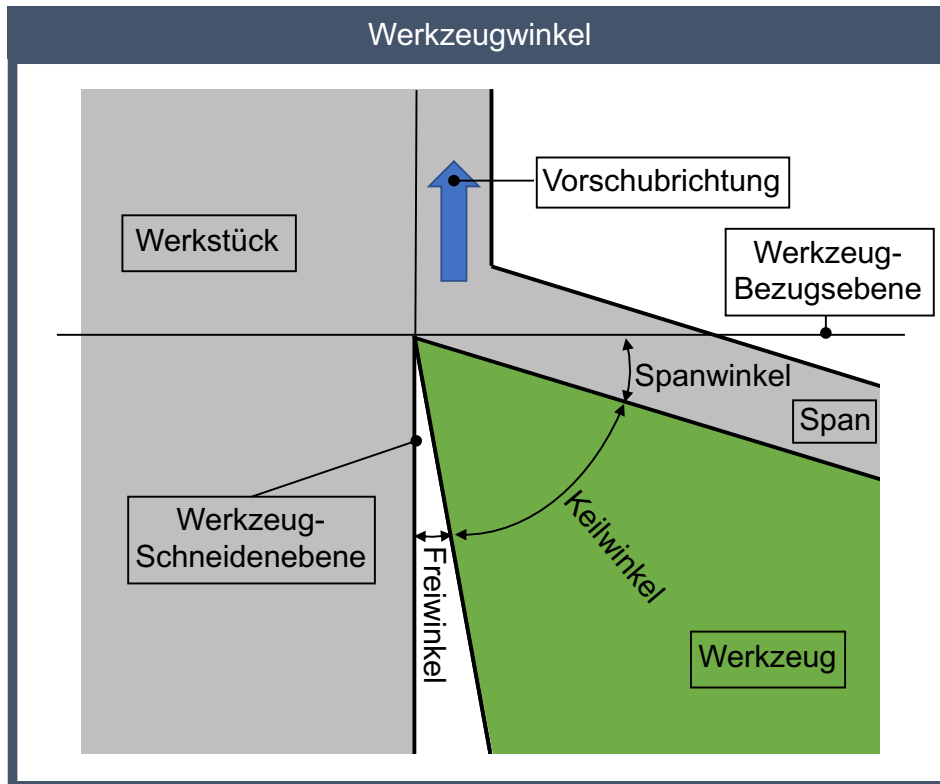


Abbildung 2.5: Winkel in der Werkzeug-Orthogonalebene, in Anlehnung an [5]

Mit zunehmendem Spanwinkel wird der Keilwinkel kleiner. Dadurch ist eine kleinere Schnittkraft für das Eintreiben des Schneidkeils in das Werkstück notwendig. Bei hoher Beanspruchung des Keils (z.B. bei harten und festen Werkstoffen) wird ein kleiner Spanwinkel gewählt, der auch negative Winkelwerte annehmen kann. Für den Freiwinkel genügen einige wenige Winkelgrade (bspw. 5°), da über diesen Winkel vor allem die Reibung zwischen dem zu zerspanenden Werkstoff und dem Werkzeug gering gehalten werden soll [4].

2.1.3 Kräfte und Geschwindigkeiten an der Schneide

Die Kenntnis über die Größe und Richtung der Zerspankraft und ihrer Komponenten ist aus mehreren Gründen sehr bedeutsam. Bei der Auslegung von Werkzeugmaschinen müssen diese Größen herangezogen werden, um anforderungsgerechte Gestelle, Antriebe, Führungen und Werkzeugsysteme zu definieren. Ebenso müssen die Durchbiegungen an bzw. in der Maschine, die durch diese Kräfte entstehen, klein gehalten werden, um vorgegebene Werkstückgenauigkeiten zu erreichen. Über diese Kraft- und Geschwindigkeitskomponenten können die Vorgänge bei der Spanentstehung ermittelt und das Verschleißverhalten erklärt werden. Es wird allgemein vereinfacht angenommen, dass die flächenhaft verteilten Kräfte an einem Punkt angreifen [2,3,6].

Die Zerspankraft F und die Geschwindigkeiten an der Schneide lassen sich nach DIN 6584 mit zwei senkrecht aufeinander stehenden Ebenen, der Arbeits- und der Wirk-Bezugsebene, wie in *Abbildung 2.6* zu sehen, in ihre Komponenten zerlegen [3].

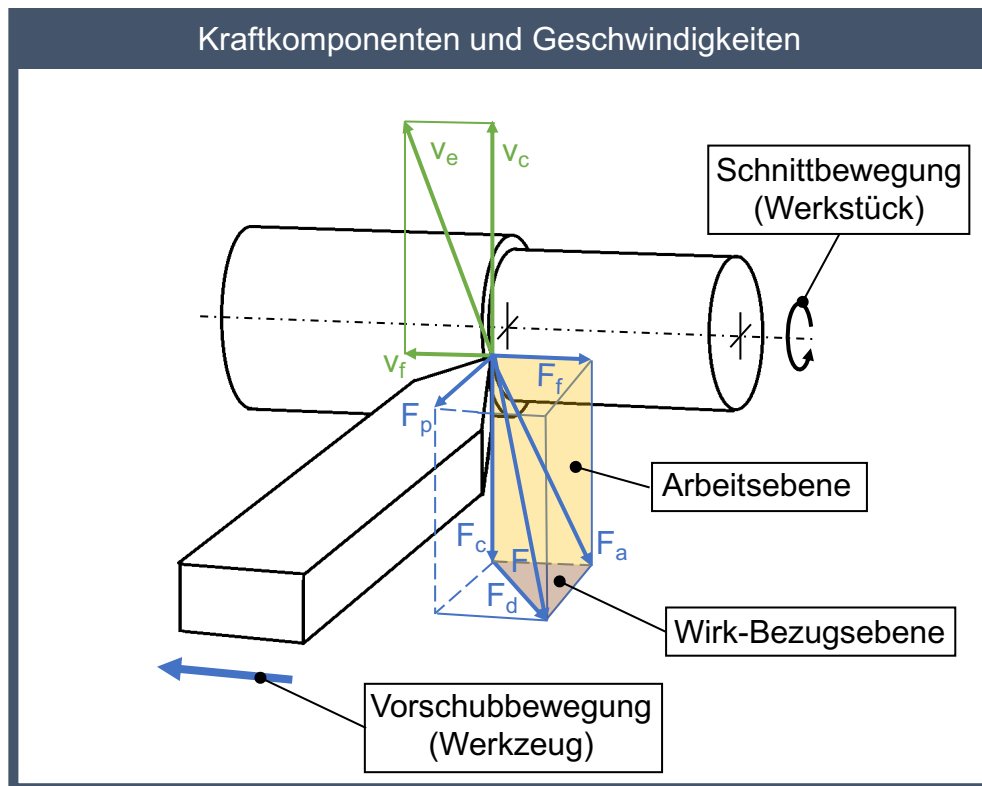


Abbildung 2.6: Kraft- und Geschwindigkeitskomponenten am Beispiel eines Drehmeißels, in Anlehnung an [3]

Kräfte, die auf das Schneidwerkzeug wirken, werden folgendermaßen bezeichnet:

- Zerspankraft F : die beim Spannungsvorgang auf einen Schneidkeil wirkende Gesamtkraft.

Im Folgenden sind die Komponenten der Zerspankraft in der Arbeitsebene zerlegt:

- Aktivkraft F_a : die Projektion der Zerspankraft auf die Arbeitsebene.
- Schnittkraft F_c : die Projektion der Zerspankraft auf die Schnittrichtung.
- Vorschubkraft F_f : die Projektion der Zerspankraft auf die Vorschubrichtung.

Im Folgenden sind die Komponenten der Zerspankraft in der Wirk-Bezugsebene zerlegt:

- Passivkraft F_p : die Projektion der Zerspankraft auf eine Senkrechte zur Arbeitsebene.
- Drangkraft F_d : die Projektion der Zerspankraft auf eine Senkrechte zur Hauptschnittfläche.

Folgende Geschwindigkeiten (siehe *Abbildung 2.6*) treten beim Zerspanungsprozess auf:

- Schnittgeschwindigkeit v_c
- Vorschubgeschwindigkeit v_f
- Wirkgeschwindigkeit v_e (resultiert aus den beiden anderen Geschwindigkeitskomponenten).

2.1.4 Berechnung der Schnittkraft und der Schnittleistung

Die Schnittkraft F_c ist jene für die Leistungsberechnung und für die kräftemäßige Auslegung der Werkzeugmaschine herangezogene Kraftkomponente. Sie ist in erster Linie abhängig vom zu zerspanenden Werkstoff und von den Prozessbedingungen (Schnitttiefe, Vorschub, Schnittgeschwindigkeit und Schneidenform) [2,7].

Die für die Schnittkraft erforderlichen Spanungsgrößen sind in *Abbildung 2.7* veranschaulicht, und werden wie folgt bezeichnet:

- a_p ... Schnitttiefe in mm
- f Vorschub in mm
- h ... Spanungsdicke in mm
- b ... Spanungsbreite in mm
- A ... Spanungsquerschnitt in mm^2
- κ Einstellwinkel in $^\circ$

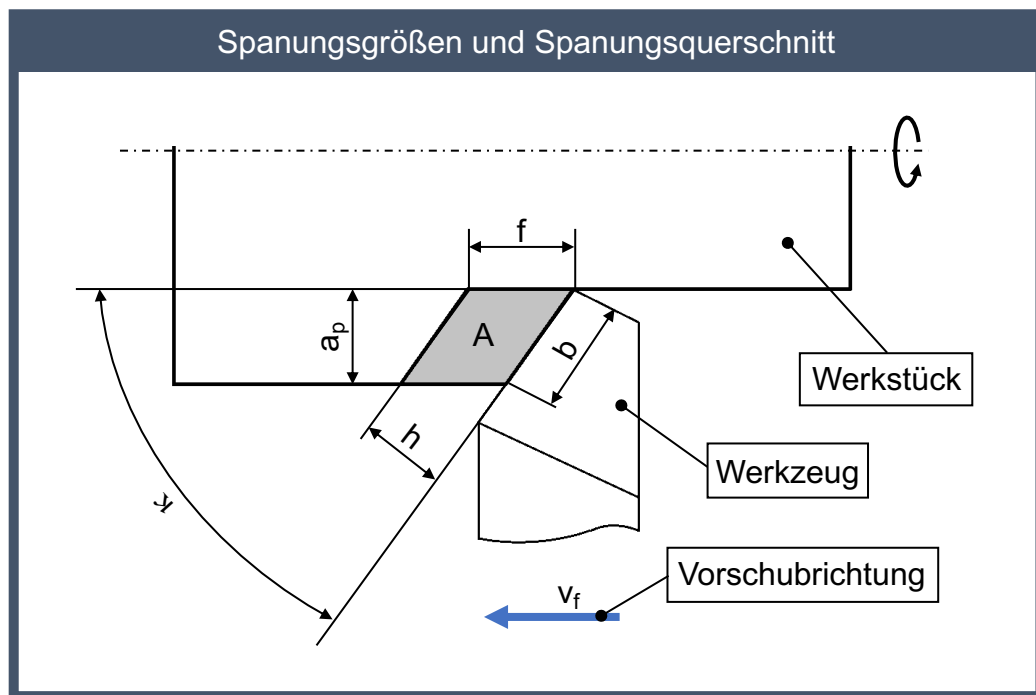


Abbildung 2.7: Zerspanungsgrößen am Beispiel eines Drehmeißels, in Anlehnung an [2]

Der Spanungsquerschnitt A (siehe *Abbildung 2.7*) ergibt sich wie folgt (Formel 2.1), und ist der Querschnitt des zu trennenden Spanes senkrecht zur Schnitttrichtung [2,7]:

$$A = b * h = a_p * f \text{ in mm}^2 \quad (2.1)$$

Die Spanungsbreite b und -tiefe h werden über den Einstellwinkel κ und der Schnitttiefe a_p bzw. mit dem Vorschub f wie folgt berechnet [2,7]:

$$b = \frac{a_p}{\sin(\kappa)} \text{ in mm} \quad (2.2)$$

$$h = f * \sin(\kappa) \text{ in mm} \quad (2.3)$$

Die Schnittkraft F_c , die senkrecht auf den Spanungsquerschnitt A wirkt, wird folgendermaßen berechnet [2,7]:

$$F_c = A * k_c \text{ in N} \quad (2.4)$$

Die in der oberen Gleichung verwendete Größe k_c wird als spezifische Schnittkraft bezeichnet und ist eine reine Rechengröße. Sie kann als der auf die Flächeneinheit des Spanungsquerschnittes A wirkende Teil der Schnittkraft F_c verstanden werden. Die spezifische Schnittkraft hängt von vielen Einflussfaktoren ab, wobei die Spanungsdicke h , der Spanwinkel γ und die Schnittgeschwindigkeit v_c den größten Einfluss haben [4].

Die im Jahre 1957 von Kienzle und Viktor veröffentlichten Versuchsergebnisse ermöglichen die Berechnung der k_c -Werte für jeden Werkstoff bei festgelegten einheitlichen Ausgangsbedingungen. Der dadurch ermittelte Bezugswert der spezifischen Schnittkraft wird als $k_{c1.1}$ bezeichnet. Bei abweichenden Ausgangsbedingungen können diese durch Korrekturfaktoren berücksichtigt werden. Der Einfluss der Spanungsdicke h auf die spezifische Schnittkraft k_c lässt sich mit der Formel 2.5 nach Kienzle (siehe auch *Abbildung 2.8*) darstellen [4]:

$$k_c = \frac{k_{c1.1}}{h^m} \quad (2.5)$$

Es ergibt sich im doppeltlogarithmischen Schaubild eine Gerade mit fallender Neigung, welche mit dem Buchstaben m gekennzeichnet ist [4].

$$m = \tan(\varphi) \quad (2.6)$$

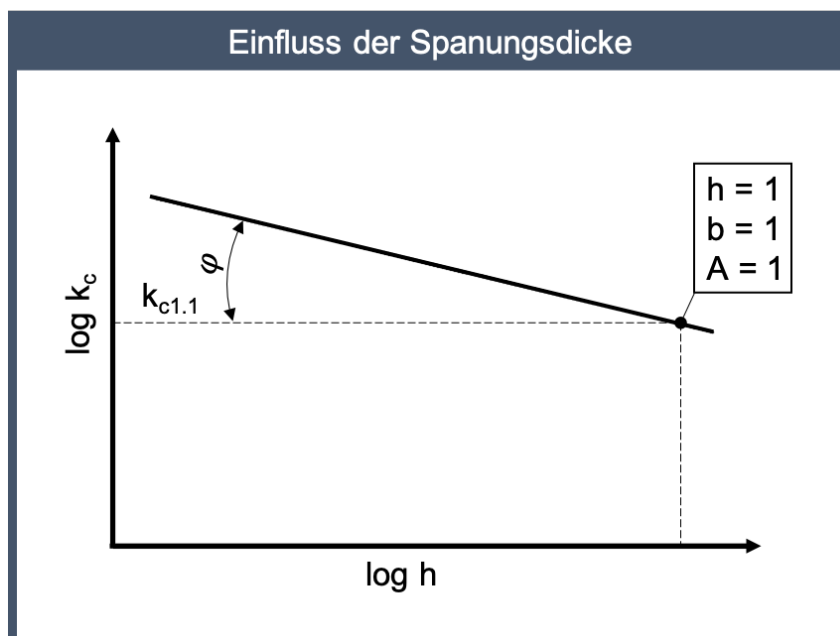


Abbildung 2.8: Abhängigkeit der spezifischen Schnittkraft k_c von der Spanungsdicke h , in Anlehnung [4]

Die Neigung m der Geraden ist für jeden Werkstoff anders und wird in den Zerspanungsversuchen bestimmt. Für die unterschiedlichen Werkstoffe können die jeweiligen Werte aus Tabellenwerken abgelesen werden [4].

Man erhält somit für die Spanungsdicke h den Korrekturwert K_h :

$$K_h = h^{1-m} \text{ in mm} \quad (2.7)$$

Die Schnittkraft F_c lässt sich somit umschreiben auf:

$$F_c = b * h^{1-m} * k_{c1.1} \text{ in N} \quad (2.8)$$

Falls es erforderlich ist, können noch weitere Korrekturfaktoren, die den Spanwinkel, die Schnittgeschwindigkeit, den Schneidstoff und den Verschleißzustand betreffen, eingeführt werden. Durch die Einführung dieser weiteren Korrekturfaktoren lässt sich die Schnittkraft F_c nach folgender Formel 2.9 berechnen [4]:

$$F_c = b * h^{1-m} * k_{c1.1} * K_\gamma * K_v * K_{sch} * K_{ver} \text{ in N} \quad (2.9)$$

Die daraus resultierende Schnittleistung P_c errechnet sich aus dem Produkt der Geschwindigkeit und der Kraftkomponente, welche in dieser Richtung liegt [4]:

$$P_c = \frac{F_c * v_c}{60\,000} \text{ in kW} \quad (2.10)$$

F_c ... Schnittkraft in N

v_c ... Schnittgeschwindigkeit in m/min

2.1.5 Spanbildung, Spanarten und Spanformen

Beim Spanen wird der Werkstoff in Form dünner Lamellen abgeschert. Die dabei entstehenden Lamellen gleiten in einer Ebene ab, die als Scherebene bezeichnet wird und mit der Schnittrichtung des Werkzeuges den Scherwinkel ϕ einschließt. Die Scherebene breitet sich von der Hauptschneide bis zur Oberfläche des Werkstückes aus. Diese Vereinfachung der Spanbildung ist eine prinzipielle Modellvorstellung und kann nicht auf die exakte Spanbildung übertragen werden. Bei der tatsächlichen Spanbildung spielen der zu zerspanende Werkstoff und die Schnittbedingungen eine wesentliche Rolle. Somit können verschiedene Spanarten beobachtet und unterschieden werden. Grundsätzlich unterscheidet man vier Spanarten nach ihrer Entstehung (siehe *Abbildung 2.9*) [2,4,8]:

- **Reiß- bzw. Bröckelspan:** Entstehen bei spröden Werkstoffen wie z.B. Gusseisen, Gussbronze und Messing, die ein geringes plastisches Verhalten besitzen. Bei der Spanbildung reißen einzelne Spanteile ab, ohne dass sie wesentlich verformt werden. Diese Spanart ist besonders abhängig von der Schnittgeschwindigkeit und dem Spanwinkel. Bei niedrigen Schnittgeschwindigkeiten bis $v_c = 10$ m/min und kleinen bis negativen Spanwinkeln können auch bei der Zerspanung von zähen Werkstoffen (u.a. Stähle) mit niedriger Bruchdehnung Reiß- bzw. Bröckelspäne entstehen.
- **Scherspan:** Bei duktilen Werkstoffen kommt es bei steigender Schnittgeschwindigkeit und größer werdendem Spanwinkel zur Entstehung von Scherspänen. In der Scherzone werden Spanlamellen nur in geringem Maß verformt, jedoch können die Spanlamellen teilweise miteinander verschweißt sein. Die Bildung von Scherspänen kann auch durch die hervorgerufene Versprödung des Gefüges aufgrund der Verformung in der Scherzone verursacht werden (z.B. an den Korngrenzen austenitischer Stähle).

Der Schnittgeschwindigkeitsbereich für die Bildung von Scherspänen liegt zwischen 20 m/min bis 80 m/min und ist vom bearbeiteten Werkstoff abhängig. In diesem Schnittgeschwindigkeitsbereich kommt es auch zur sogenannten Aufbauschneidenbildung, die in weiterer Folge genauer erklärt wird. Bei stark positivem Spanwinkel und konstanter Schnittgeschwindigkeit tendiert der Scherspan zum Fließspan und die Neigung zur Aufbauschneidenbildung nimmt ab.

- Lamellenspan: Diese Art von Span entsteht, wenn der Verformungsgrad in der Scherebene im Fließbereich liegt ($\epsilon_B < \epsilon_0 < \epsilon_Z$) oder das Gefüge ungleichmäßig ist und die dadurch entstehenden Schwingungen zu Schwankungen der Spannungsdicke führen. Sowohl bei hohen Vorschüben als auch bei hohen Schnittgeschwindigkeiten können Lamellenspäne entstehen.
- Fließspan: Das kontinuierliche Fließen des Spanes wird durch die ansteigende Schnittgeschwindigkeit beim Spanen in der Scherzone verursacht. Es kommt zur starken Verschweißung der einzelnen Spanlamellen, die in der Scherzone nicht mehr voneinander getrennt werden. Die Fließspanbildung beginnt für Stahl bei einer Schnittgeschwindigkeit von etwa 80 m/min, wobei es in diesem Bereich selten zur Aufbauschneidenbildung kommt. Wird mit einem sehr stark positiven Spanwinkel gearbeitet, kann es für Stahl auch bei niedrigen Schnittgeschwindigkeitsbereichen zur Entstehung von Fließspänen kommen. In der heutzutage dominierenden Schnellzerspanung bereiten Fließspäne die meisten Probleme.

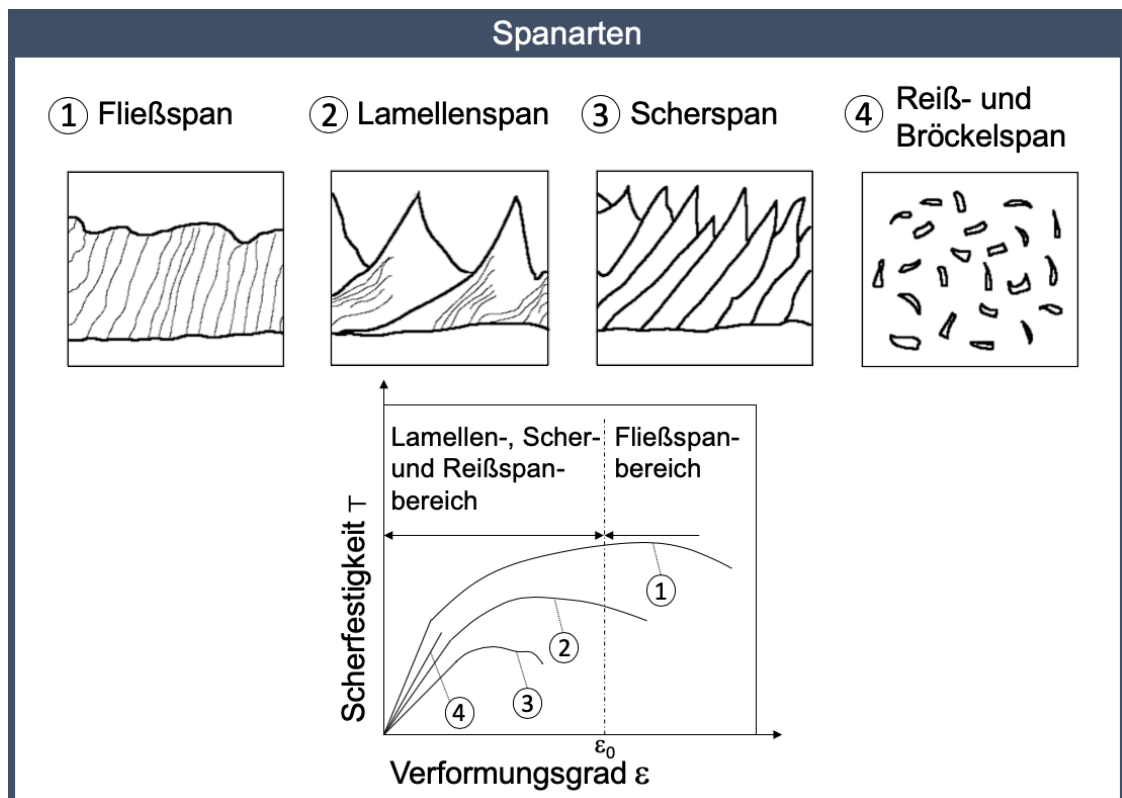


Abbildung 2.9: Spanarten in Abhängigkeit von den Werkstoffeigenschaften, in Anlehnung [2,7]

Die Aufbauschneide (siehe *Abbildung 2.10*) tritt bei der Entstehung von Scherspänen auf. Dabei eilt der Schneide ein Riss voraus. Der durch den Riss entstandene, kegelförmige Hohlraum füllt sich zur Gänze mit kleinen Spänelementen. Durch den Schnittdruck werden die kleinen Spänelemente auf die Spanfläche gedrückt. Dabei entsteht ein turmförmiger Keil, der für kurze Zeit die Aufgabe der Schneide übernimmt. Wird so eine bestimmte Größe der „Aufbauschneide“ erreicht, werden diese Materialanhäufungen an der Spanfläche vom Span weggerissen. Diese Materialanhäufung wird zu einem Teil über die Spanfläche mit den Spänen abgeführt, zum anderen Teil presst sie sich über die Werkzeugschneide in die bearbeitete Oberfläche des Werkstückes. Besonders beim Schlichten sollte keine Aufbauschneide entstehen, da sonst die Oberflächengüte drastisch darunter leiden würde. Um die Aufbauschneidenbildung zu verhindern, muss die Schnittgeschwindigkeit erhöht werden. Durch diese stellt sich ein höheres Temperaturniveau ein, wodurch der aufgeschweißte Werkstoff infolge seiner geringen Festigkeit vom Span mitgerissen wird [2,9].

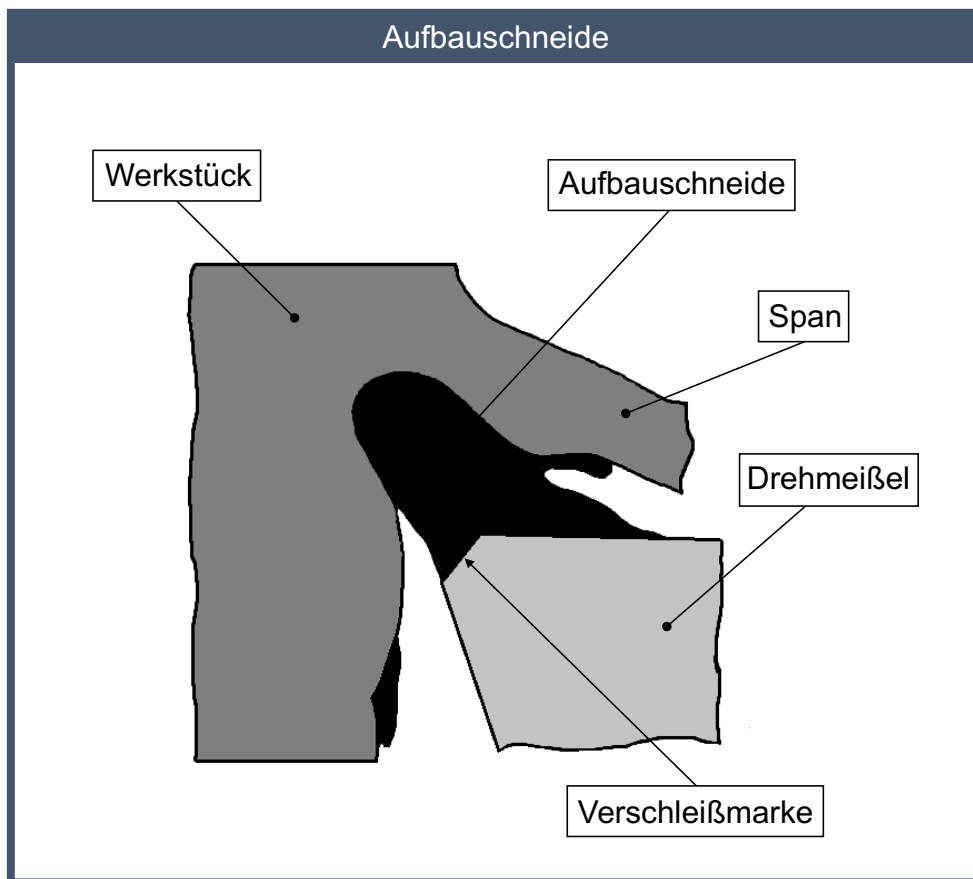


Abbildung 2.10: Darstellung einer Aufbauschneide, in Anlehnung [2]

Die Spanformen, nicht zu verwechseln mit den Spanarten, gehen manchmal ineinander über und können nicht immer eindeutig unterschieden werden. Die Spanform eines Spanes ergibt sich nach dessen Verlassen der Spanfläche. In der nachfolgenden *Abbildung 2.11* werden die unterschiedlichen Spanformen dargestellt. Besonders bei Bearbeitungsverfahren mit begrenztem Spanraum, wie z.B. dem Bohren, bei welchem die Späne durch die begrenzten Spannuten abgeführt werden, hat die Spanform eine sehr große Bedeutung und muss berücksichtigt werden. Die Spanraumzahl R dient als Kennziffer für die Brauchbarkeit von Spänen und wird wie folgt berechnet [2,9]:

$$R = \frac{V_1}{V_0} = \frac{\text{ungeordnete Spanmenge}}{\text{abgespanntes Volumen}} \quad (2.11)$$

Bei ungebrochenen Spänen liegt das Volumenverhältnis je nach Werkstoff von $R = 80$ bis 100 , wobei es bei gut gebrochenen Spänen zwischen 3 bis 15 liegt [2].









Spanformen				
		Spanraumzahl R	Spanform- klasse	Beurteilung
Bandspäne		≥ 90	1	ungünstig
Wirrspäne		≥ 90	2	
Flachwendel- späne		≥ 50	3	
lange, zylindr. Wendelspäne		≥ 50	4	
Wendelspan- stücke		≥ 25	5	gut
Spiralspäne		≥ 8	6	
Spiralspan- stücke		≥ 8	7	brauchbar
Bröckelspäne		≥ 3	8	

Abbildung 2.11: Spanformen und ihre Beurteilung nach der Spanraumzahl R [9]

2.1.6 Verschleißformen an der Schneide

Unter dem Verschleiß eines Schneidwerkzeuges wird die Abnutzung des unter Schnitt stehenden Schneidteiles durch metallische und thermische Beanspruchung während des Zerspanungsvorganges bezeichnet. Der Abtrag von Schneidenmaterial bzw. der Ausbruch der Werkzeugschneide wird als mechanischer Verschleiß zusammengefasst. Dieser wird durch die Reibung zwischen Werkstück und Werkzeug hervorgerufen. Der mechanische Verschleiß kann durch weitere Ursachen, wie Gefügeveränderungen im Schneidstoff, Verschweißung zwischen Werkstoff und Schneidstoff sowie elektrochemischen Vorgängen beschleunigt werden. Weiters gibt es den thermischen Verschleiß, der bei hohen Schnittgeschwindigkeiten und Werkzeugtemperaturen über 400° überwiegt. Folgende Verschleißformen können an Kanten und Flächen des Schneidkeiles auftreten [2,3,9]:

- Freiflächenverschleiß (*Abbildung 2.12*): ein annähernd gleichmäßiger Abtrag vom Schneidstoff an der Freifläche des Werkzeuges. Er ist durch eine deutliche Markierung an den Freiflächen der Haupt- und Nebenschneide gekennzeichnet. Die entstehende Verschleißfläche wird als die sogenannte Verschleißmarke bezeichnet und liegt parallel zur Schnittrichtung. Bei sehr kleinen Freiwinkeln steigt die Verschleißmarkenbreite wegen der größer werdenden Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück an.

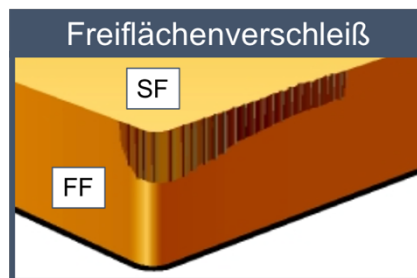


Abbildung 2.12: Freiflächenverschleiß;
SF = Spanfläche, FF = Freifläche [10]

- Aufbauschneiden: gehören ebenso zu Verschleißformen von Schneidwerkzeugen, siehe Kapitel 2.1.5.
- Kolkverschleiß (*Abbildung 2.13*): ein muldenförmiger Abtrag des Schneidstoffes an der Spanfläche. Diese verschleißbedingt entstehende, muldenförmige Vertiefung an der Spanfläche wird als Kolk bezeichnet. Für die genaue Beschreibung und Kennzeichnung des Kolkverschleißes werden weitere Maße, wie die Kolktiefe (KT), die Kolklippenbreite (KL) und der Kolkmittenabstand (KM), eingeführt.

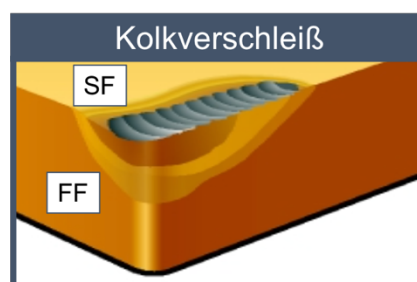


Abbildung 2.13: Kolkverschleiß [10]

- Weitere Verschleißformen sind: Kerbverschleiß (*Abbildung 2.14*), plastische Verformung (*Abbildung 2.15*), Kammrisse (*Abbildung 2.16*) und Ausbrüche (*Abbildung 2.17*)

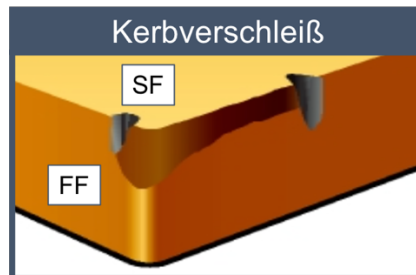


Abbildung 2.14: Kerbverschleiß [10]

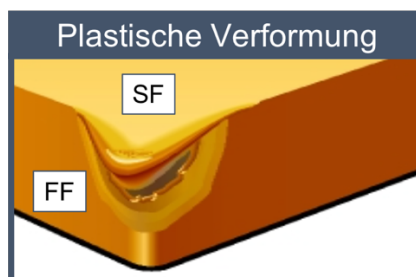


Abbildung 2.15: Plastische Verformung [10]

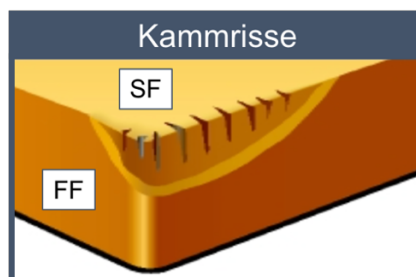


Abbildung 2.16: Kammrisse [10]

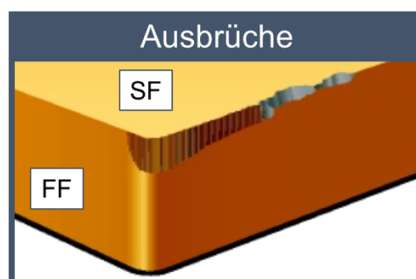


Abbildung 2.17: Ausbrüche [10]

2.1.7 Energieumsetzung und Temperatur an der Schneide

Während des Zerspanungsprozesses wird mechanische Leistung zugeführt, wobei die Leistung aus der Vorschubbewegung vernachlässigbar ist. Aufgrund folgender physikalischer Effekte wird die Schnittleistung P_c in Wärme oder potentielle Energie umgesetzt [9]:

- Umformung, Scherung
- Reibung
- Stofftrennung
- Stoffumlenkung
- Eigenspannungen

Die über die Umformung und Reibung umgesetzte Schnittleistung wird im Wesentlichen als Wärme abgeführt. Dabei wird die Wärme in den Span, das Werkzeug, das Werkstück und an die Umgebung abgeführt. Einen besonders großen Einfluss auf die Verteilung des Wärmestromes hat die Schnittgeschwindigkeit. Die kleineren Anteile der physikalischen Effekte werden in der Werkstückrandzone und im Span als elastische Energie gespeichert [9].

Ein weiterer wichtiger Aspekt für den Verschleiß am Schneidwerkzeug ist die vorherrschende Temperatur am Schneidkeil. Besonders Oxidations- und Diffusionsvorgänge, die auch in gewissen Maßen den Verschleiß am Werkzeug beeinflussen, werden mit höheren Temperaturen stark beschleunigt. Ebenso wird durch die Temperatur an den Randschichten des Werkstückes dessen Randzone beeinflusst. Es können Härteveränderungen, Eigenspannungen und Gefügeumwandlungen im zerspannten Werkstoff entstehen [9].

2.2 Schneidstoffe

Der Schneidstoff einer Werkzeugschneide ist ein sehr wesentlicher Einflussfaktor im Bereich spanender Prozesse. Dieser kann die Wirtschaftlichkeit des gesamten Zerspanungsprozesses, wie z.B. Werkzeugwechselzeiten, Fertigungszeiten sowie Werkzeug-, Maschinen- und Lohnkosten, durch das Verschleißverhalten beeinflussen. Deshalb ist die Entwicklung in der Zerspanungstechnik eng mit der Entwicklung von Schneidstoffen verknüpft. Es werden vorhandene Schneidstoffe weiterentwickelt und neue Materialien für die Herstellung von Zerspanungswerkzeugen erforscht [3,9].

2.2.1 Einteilung der Schneidstoffe

Die Anforderungen an Schneidstoffe nimmt durch den Einsatz neuer Werkstoffe, den stetig zunehmenden Schnittgeschwindigkeiten und kürzeren Bearbeitungszeiten zu. Um den Beanspruchungen gerecht zu werden, muss der Schneidstoff verschiedene Eigenschaften besitzen, wie beispielsweise die folgenden [3]:

- Härte und Druckfestigkeit
- Biegefestigkeit und Zähigkeit
- Kantenfestigkeit
- innere Bindefestigkeit
- Warmfestigkeit
- Oxidationsbeständigkeit
- geringe Diffusions- und Adhäsionsneigung

Die aufgelisteten Eigenschaften sind zum Teil widersprüchlich und können aufgrund physikalischer Gesetze nicht einem bestimmten Schneidstoff gleichzeitig innewohnen. Bei der Entwicklung und Erforschung von Schneidstoffen ist das anzustrebende Ziel die Entdeckung des „idealen“ Schneidstoffes. Die Einteilung der Schneidstoffe nach Zähigkeit bzw. Biegefestigkeit und Verschleißfestigkeit bzw. Warmfestigkeit ist in *Abbildung 2.18* ersichtlich. Eine allgemeine Kategorisierung der Schneidstoffe wird in *Abbildung 2.19* dargestellt [3,8,9].

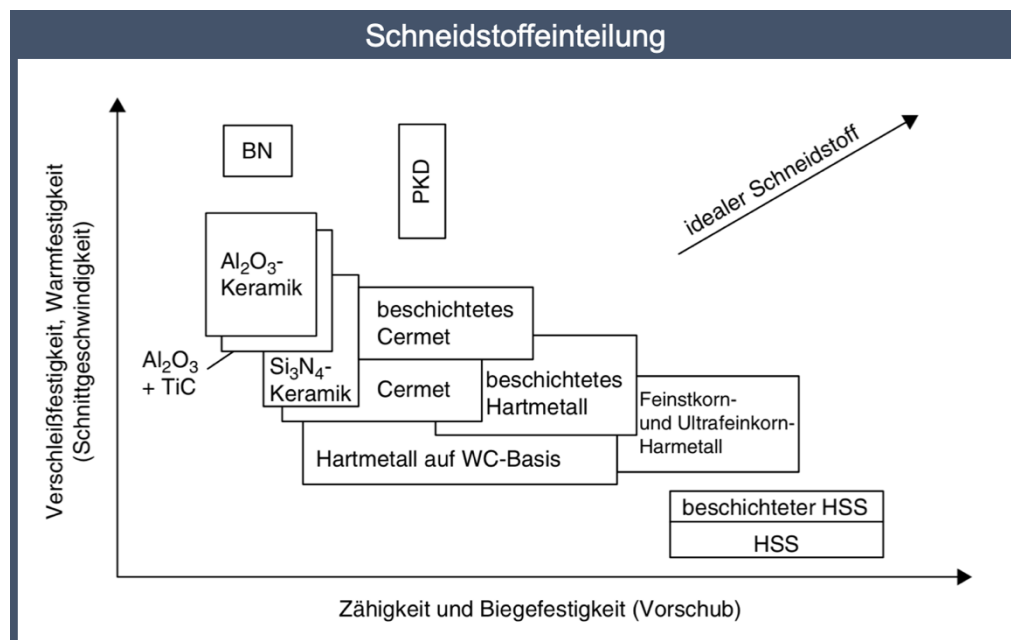


Abbildung 2.18: Einteilung der Schneidstoffe anhand der Verschleißfestigkeit und der Zähigkeit [9]

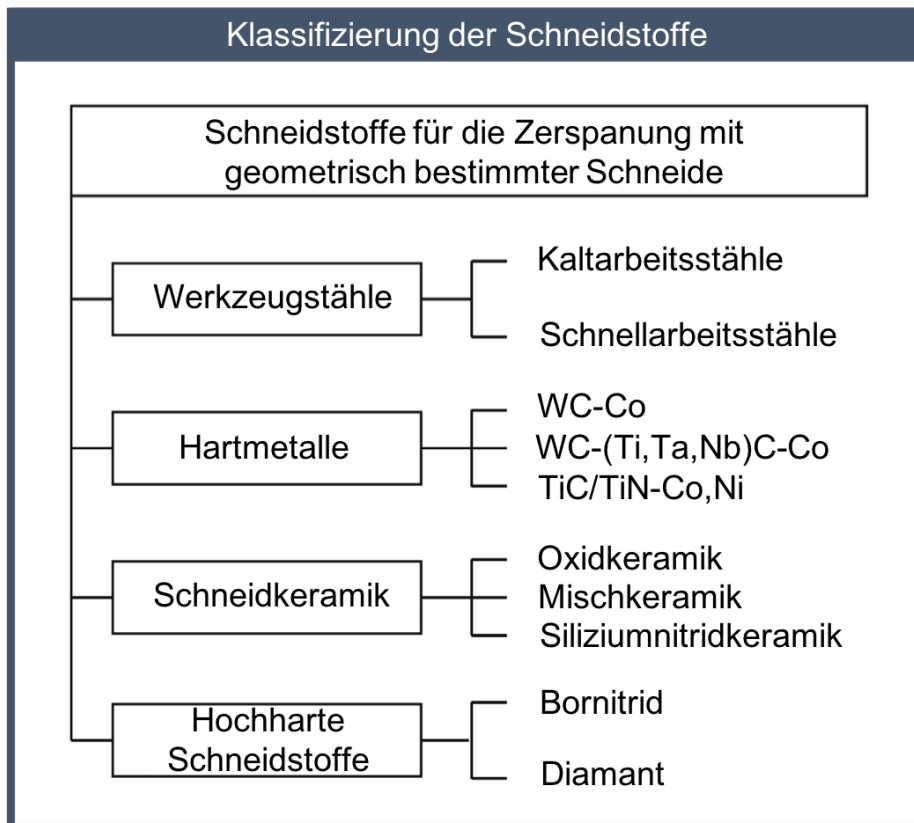


Abbildung 2.19: Einteilung der Schneidstoffe für die Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide [3]

2.2.2 Hartmetall

Hartmetalle werden pulvermetallurgisch aus zwei- oder mehrphasigen Legierungen hergestellt. Die Zähigkeit der Legierung wird über ein Bindemetall (β -Phase) bestimmt, als Härte-träger dienen Metallkarbide oder Metallkarbonitride. Um die gewünschte Härte zu erreichen, werden Hartstoffe wie Wolframkarbid (WC, α -Phase), Titan-, Tantal- und Niobkarbid (TiC, TaC, NbC, γ -Phase) oder Titankarbonitrid bzw. andere Titanmischkarbide verwendet [2,3].

Die Besonderheit bei Hartmetallen ist die gute Kombinationsmöglichkeit der physikalischen Eigenschaften Zähigkeit und Härte. Die Voraussetzung dieser Besonderheit ist, dass Cobalt (β -Phase) Wolframkarbid sehr gut benetzt und größere Teile davon lösen kann. Wegen diesem Umstand kommt es bei Hartmetallen nie entlang der Bindemetall-Karbid-Grenzflächen zu einem Bruch. Es wird durch das angesprochene Lösungsvermögen eine hohe innere Bindekraft erreicht, womit zudem eine hohe Kantenfestigkeit sichergestellt ist [2,3].

Durch die Zusammensetzung der α - und β -Phasenanteile kann der Schneidstoff und seine Charakteristik noch in gewissen Maßen variiert werden. Bei zähen Hartmetallen liegt der Co-Gehalt bei 15%, bei verschleißfesten Varianten hingegen bei 5%. Die Diffusionsneigung des WC-Hartmetalls kann durch das Beimengen von Titankarbid in die Legierung verringert werden. Die Warmverschleißfestigkeit des

Hartmetalls verbessert sich dadurch ebenso, jedoch nimmt die Bindefähigkeit ab und somit werden auch die Zähigkeit und Kantenfestigkeit herabgesetzt [2].

Eine der neuesten und wichtigsten Entwicklungen im Bereich des Hartmetalls sind Feinkorn- und Ultrafeinkorn-Hartmetalllegierungen, deren Härte nochmals höher angesiedelt ist als bei herkömmlichen Hartmetallen. Die zum Einsatz kommenden WC-Korngrößen liegen zwischen $0,2\ \mu\text{m}$ – $0,8\ \mu\text{m}$, wobei die Größe des Kornes vom Cobaltgehalt abhängig ist. Durch deren Anwendung erhält man zum einen eine gleichmäßige Mikrostruktur mit nahezu runden Kornformen, und zum anderen eine höhere Verdichtung des feinen Pulvers [2,3].

2.2.3 CBN (kubisch kristallines Bornitrid)

Das kubisch kristalline Bornitrid (CBN) ist nach Diamant der härteste Schneidstoff. CBN hat gegenüber dem Diamantwerkstoff den großen Vorteil, dass es chemisch beständig gegenüber Eisen und anderen karbidbildenden Werkstoffen ist. Die maximale Einsatztemperatur liegt bei 1400°C . Die Oxidation von CBN kann bei Normalatmosphäre durch eine Schutzschicht von Boroxid (B_2O_2) bis 1300°C verhindert werden. Somit erhöht sich die Anzahl bearbeitbarer Werkstoffe, die einen großen Vorteil gegenüber dem Diamanten mit sich bringt [2].

Bornitrid hat eine hexagonal kristalline Form und lässt sich wie der Diamant durch eine Hochdruck-Hochtemperatursynthese in die kubisch kristalline Modifikation überführen, wodurch im Gitter eine kovalente Bindung vorherrscht. Die Gewinnung von hexagonalem Bornitrid erfolgt mittels Pyrolyse aus Bor-Halogenverbindungen. Der dabei entstehende braun bis schwarze CBN kann auf den Einsatz von Lithium als Katalysator bei der Pyrolyse zurückgeführt werden. Ähnlich dem Diamant können auch aus CBN-Körnern durch Hochdruck-Flüssigphasensintern polykristalline Schichten auf Hartmetall oder zu Massivkörper verarbeitet werden [2].

Der große Vorteil von CBN gegenüber Hartmetall ist, dass es wesentlich weniger verschleißt. Es können dadurch, bei gleichbleibender Standzeit, höhere Schnittgeschwindigkeiten im Vergleich zu Hartmetallwerkzeugen gefahren werden. Bei der Bearbeitung hochfester Werkstoffe mit schlanken Werkzeugen oder bei höher nachgiebigen Werkstücken kann festgestellt werden, dass die Zerspanungskräfte gegenüber anderen Schneidstoffen geringer ausfallen. Die Gründe dafür sind geometrischer und tribologischer Natur. Der Einsatz von CBN hat große Bedeutung bei instabilen Bearbeitungsbedingungen oder bei unterbrochenen Schnitten in der Hartbearbeitung von Stählen [2].

2.2.4 PKD (polykristalliner Diamant)

Diamant ist der härteste bekannte Werkstoff und gehört wie CBN zur Gruppe der hochharten Schneidstoffe. Er besteht aus reinem Kohlenstoff, der in der stabilen Modifikation als Graphit auftritt und in der instabilen Hochdruckmodifikation als Diamant. Die Erstarrung des Diamanten erfolgt kubisch-kristallin. Im Gittersystem ist jedes Kohlenstoffatom von vier benachbarten Kohlenstoffatomen umgeben. Aufgrund der hohen Bindungsenergie der kovalent tetraedisch miteinander verbundenen C-Atome ist Diamant zur Zeit der härteste bekannte Schneidstoff [2,3].

Diamanten werden als Schneidstoff in zwei Gruppen aufgeteilt, den monokristallinen und den polykristallinen Diamanten. Die monokristallinen Diamanten (MKD) können aus der Natur bergmännisch abgebaut oder synthetisch hergestellt werden. Die polykristallinen Diamanten (PKD) werden entweder durch das Versintern von monokristallinen Diamanten oder mittels neuerer Herstellungsverfahren aus einer Gasphase abgeschieden (CVD) [11].

Monokristalline Diamanten haben aufgrund ihrer Gitterstruktur ein anisotropes Materialverhalten. Somit sind die physikalischen Eigenschaften wie Härte, Festigkeit, E-Modul und Wärmeleitfähigkeit richtungsabhängig. Beim Einsatz als Werkzeug sollte beachtet werden, dass die Bearbeitungsrichtung möglichst in der harten und verschleißfesten Richtung des monokristallinen Diamanten liegt. Die hohen Anlage- und Werkzeugkosten zur synthetischen Herstellung von großen Monokristallen verhindern den wirtschaftlichen Einsatz bei geometrisch bestimmten Verfahren. Die in der Natur gefundenen Monokristalle sind zurzeit die wirtschaftlichste Form von großen Monokristallen [2].

Polykristalline Diamanten bestehen aus willkürlich gerichteten Kristallen und haben dadurch ein isotropes Materialverhalten. Die Polykristalle sind gegenüber Monokristallen aufgrund der Isotropie, ihrer Korngrenzen und metallischen Einschlüssen wesentlich zäher. Sie weisen aber eine geringere Härte als Monokristalle auf. Der Einsatzbereich von PKD-Werkzeugen ist die Bearbeitung von NE-Metallen und Nichtmetallen. Besonders bei Werkstoffen, wie übereutektischen Aluminium-Siliziumlegierungen oder glasfaserverstärkten Kunststoffen, deren Zerspanung zu sehr starkem Verschleiß am Werkzeug führen, ist die Standzeit von PKD-Werkzeugen und somit die Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu anderen Schneidstoffen sehr hoch. Die Bearbeitung von Eisen-Kohlenstoff-Legierungen ist nur unter gewissen Bedingungen möglich [2].

In den nachfolgenden Unterpunkten wird speziell auf die Bearbeitung von Eisen-Kohlenstoff-Legierungen mit PKD-Werkzeugen näher eingegangen [2].

2.3 PKD-Wendeschnidplatten

Es gibt eine Vielzahl von Schneidwerkzeugherstellern, die je nach Bearbeitungswerkstoff den passenden Schneidstoff anbieten. Besonders auf dem Sektor der PKD-Werkzeuge können die Spezifikationen der einzelnen Hersteller variieren, wodurch eine große Auswahl an PKD-Wendeschnidplatten zur Verfügung steht.

2.3.1 Aufbau und Herstellung

Die Wissenschaftler der Fa. *General Electric* (GE) konnten 1971 einen Prozess zur Synthese von PKD entwickeln. Als Sinterhilfe wurde dem Diamantpulver Cobalt beigemischt. Durch den HPHT-Prozess (High Pressure High Temperature-Prozess) gelang es, ein stabiles Gefüge mit 85 % Diamantanteil zu bilden [11].

Die Herstellung von PKD-Schneidstoffen erfolgt durch das Sintern bei hohen Drücken und Temperaturen. Die Diamantkörner werden nach ihrer Größe sowie unter Berücksichtigung der Synthesebedingungen vorsortiert und durch die Beimischung eines metallischen Lösungsmittelkatalysators für den Herstellungsprozess vorbereitet. In den meisten Fällen wird Cobalt als metallischer Katalysator eingesetzt. Teilweise kommen auch Silizium, Wolfram oder Wolframkarbid zum Einsatz. Das Pulver wird zumeist auf eine Hartmetallunterlage gelegt und darauf gesintert. Während dieses Sinterprozesses kommt es zu Bindungen zwischen den Diamantkörnern, die sich zu einer Verbundmasse mit kornwüchsigem Gefüge zusammensetzen. Die Zwischenräume, die beim Zusammenwachsen der Diamantkristalle entstehen, werden vom eingesetzten Katalysator ausgefüllt. Bei grobkörnigen Diamanten werden Diamantpartikel mit unterschiedlichen Korngrößen verwendet, um die Zwischenräume zu verkleinern. Das Ergebnis ist ein sehr fester PKD-Blank, der im Gegensatz zu monokristallinem Diamant aufgrund des verbliebenen Lösungsmittelmetalls sowohl eine gewisse Zähigkeit als auch elektrische Leitfähigkeit aufweist. Die anisotropen, monokristallinen Diamantkörner werden durch den polykristallinen Aufbau zu einem statisch isotropen Gesamtkörper (siehe *Abbildung 2.20*) [3,11].

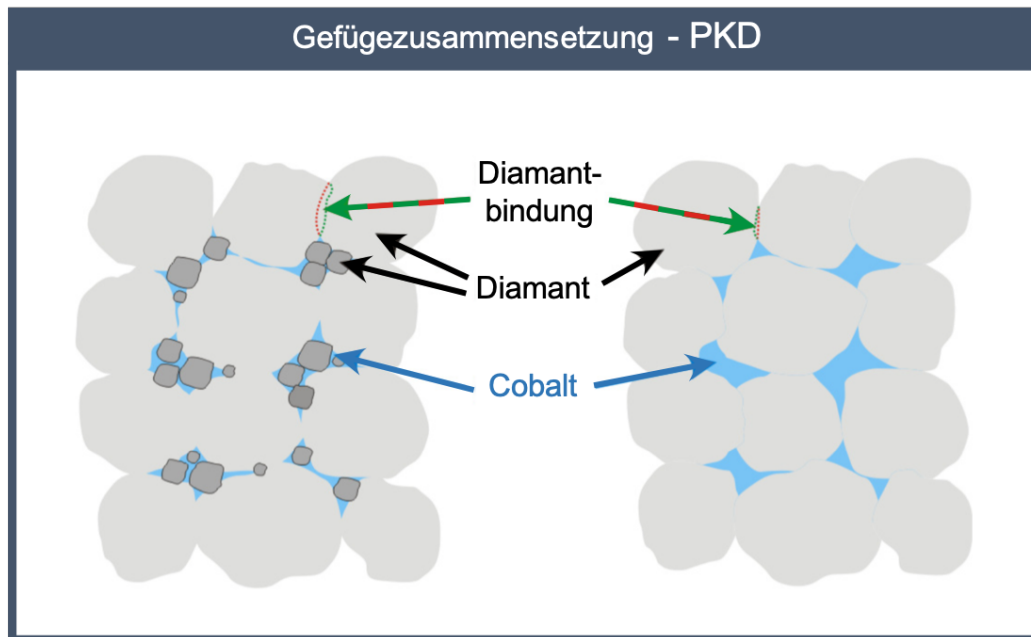


Abbildung 2.20: Gefüge von polykristallinem Diamant;
links: Mischkorn, rechts: konstante Korngröße [11]

Die Größe und die Eigenschaften der Diamantkörner, aber auch die Variation der Sinterbedingungen, ermöglichen die Herstellung verschiedener PKD-Sorten, welche auf die diversen Anwendungen (Feinbearbeitung, Schruppen) zielgerichtet angepasst werden können. Nach dem Sinterprozess werden die PKD-Ronden durch spezielle Bearbeitungsverfahren zur gewünschten Schneidengeometrie geformt [11].

2.3.2 Bearbeitung von Eisen-Kohlenstoff-Legierungen

Beim Zerspanungsprozess ist die Entwicklung von Wärme und Temperatur unvermeidlich, und kann bei zu hohen Temperaturen zur Begünstigung gewisser Verschleißarten führen. Eine Verschleißart, die besonders bei hohen Temperaturen auftritt, ist der Diffusionsverschleiß. Im Periodensystem haben bestimmte Atome die Neigung, sich miteinander zu vereinigen; man spricht dabei auch von der sogenannten Affinität. Mit der Zunahme der Temperatur können Elemente mit hoher Affinität ihren Gitterplatz im Werkstoff oder Schneidstoff verlassen und zu „wandern“ (diffundieren) beginnen. Durch diese Diffusion wird das Eindringen über die Kontaktzone in den anderen Werkstoff ermöglicht. Die Fehlstellen im ursprünglichen Werkstoff sind schließlich die Ursache für den folgenden Verschleiß [7].

Aufgrund der hohen Affinität des Eisens zum Kohlenstoff wird die Zerspanung von Eisen- und Stahlwerkstoffen mit Diamantwerkzeugen nicht empfohlen, bzw. ist diese unter herkömmlichen Bedingungen nicht wirtschaftlich. Durch die in der Kontaktzone zwischen Werkstück und Werkzeug auftretenden hohen Temperaturen wandelt sich Diamant in Graphit um und reagiert mit der zerspannten Eisen-Kohlenstoff-Legierung.

Dabei diffundieren mit zunehmender Temperatur die Kohlenstoffatome über die Kontaktzone in den Werkstückwerkstoff. Die thermische Instabilität des Diamanten, die zu dessen Graphitisierung führt, liegt in etwa bei 700°C [3,12].

Der Diamant würde – ohne den bei der Zerspanung auftretenden Materialkontakt zur Eisen-Kohlenstoff-Legierung – erst bei einer Temperatur von etwa 1500°C die Umwandlung zu Graphit durchlaufen. Aufgrund der Diffusion verliert das Zerspanungswerkzeug sehr rasch seine Schneidkantenbeständigkeit und stumpft ab. Die Verschleißmechanismen im PKD werden in *Abbildung 2.21* dargestellt [3,12].

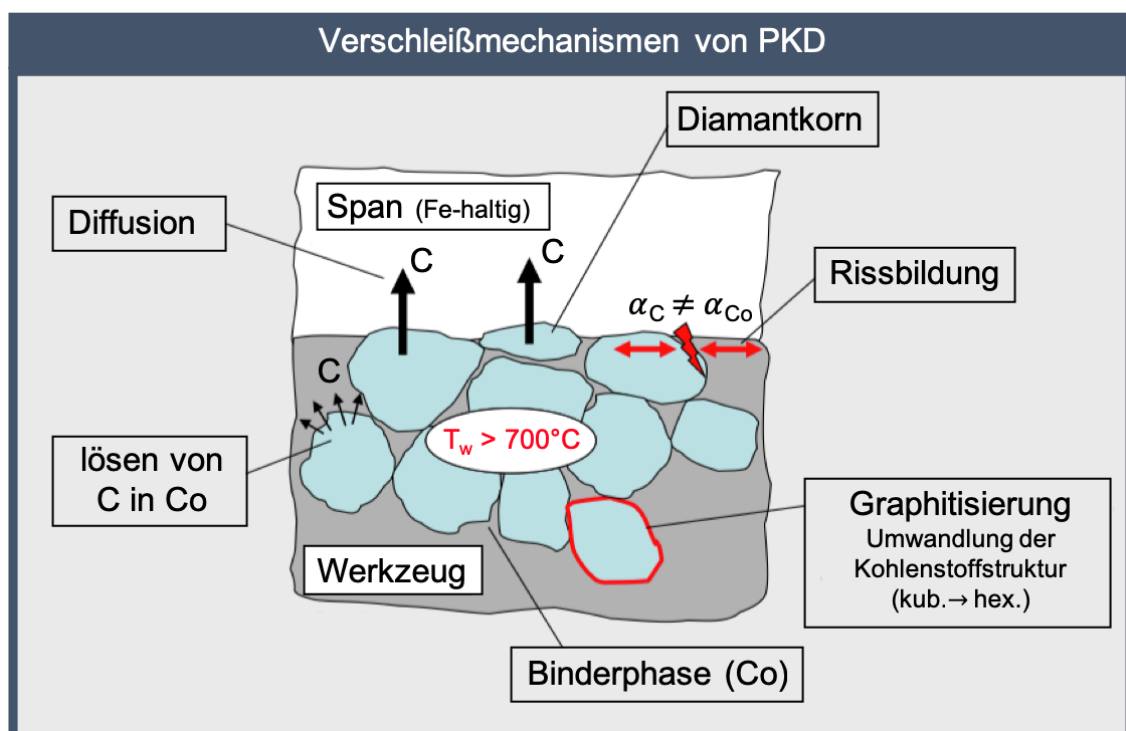


Abbildung 2.21: Temperaturabhängige Verschleißmechanismen im PKD-Schneidstoff (T_w = Werkzeugtemperatur) [13]

Die Bearbeitung von Eisen-Kohlenstoff-Legierungen mit PKD-Werkzeugen sollte jedoch unter bestimmten Voraussetzungen möglich und vor allem auch wirtschaftlich sein. Durch eine intensive Kühlung des Werkzeuges (diese kann extern oder intern erfolgen) bzw. generell der Bearbeitungszone kann die Temperatur der PKD-Schneide unter der Graphitisierungstemperatur gehalten werden. Somit können die Vorteile der herausragenden physikalischen Eigenschaften des Diamantwerkstoffes, wie der Härte und der Wärmeleitfähigkeit, bei der Zerspanung von Eisen-Kohlenstoff-Legierungen ausgenutzt werden [14].

2.3.3 Vorteile/Nachteile im Einsatz

PKD-Schneidstoffe bringen einzigartige Vorteile mit sich, die andere Schneidstoffe nicht aufweisen. In *Abbildung 2.22* werden diese Eigenschaften von Diamant anderen gängigen Schneidstoffen gegenübergestellt.

Gegenüberstellung Schneidstoffe						
Schneidstoffe	Vickershärte HV 30	Temperatur- beständigkeit	Druck- festigkeit	Biege- festigkeit	Dichte	Elastizitäts- modul
		(°C)	(10 ³ N/mm ²)	(10 ³ N/mm ²)	(g/cm ³)	(10 ³ N/mm ²)
HSS	750 - 1000	600 - 800	2,8 - 3,8	2,5 - 4,0	8 - 9	260 - 300
Hartmetalle (HW)	1300 - 1700	1100 - 1200	3,5 - 6,0	1,3 - 3,2	10,0 - 15	450 - 650
Schneidkeramik (CM)	1400 - 2400	1300 - 1800	4,3 - 4,8	0,35 - 0,65	4,0 - 4,3	370 - 420
Bornitrid (CBN)	4500	1500	2,7	0,5 - 1,0	3,1 - 3,4	680
Diamant (PKD)	bis 7000	700	7,6	0,6 - 1,0	3,8 - 4,3	750 - 840

Abbildung 2.22: Eigenschaften der Schneidstoffe im Vergleich [8,15]

Um die besonderen Eigenschaften der PKD-Schneidstoffe hervorzuheben, sind nachfolgend die wesentlichen Charakteristika nochmals aufgelistet [7,11,15]:

- Diamant ist derzeit der härteste, bekannte Schneidstoff und weist die doppelte Härte von Bornitrid auf, welcher als zweithärtester Schneidstoff gehandelt wird.
- PKD besitzt die höchste thermische Leitfähigkeit bei Raumtemperatur. Dies wirkt sich positiv auf die Wärmeabfuhr an der Schneide bzw. in weiterer Folge auch auf die Abfuhr der Prozesswärme vom/aus dem Werkstück aus.
- Eine weitere positive Eigenschaft ist der geringe thermische Ausdehnungskoeffizient, wodurch eine Formänderung an der Schneide durch die Temperaturzunahme quasi nicht vorhanden ist.
- Aufgrund der einzigartigen, physikalischen Eigenschaften des PKD-Schneidstoffes ergeben sich lange Standzeiten, die besonders in der Serienfertigung von größter Bedeutung sind. Es können bis zu 80-mal höhere Standzeiten gegenüber Hartmetall bei gleicher Oberflächenqualität und Genauigkeit erreicht werden.
- Die PKD-Schneide kann sowohl für die Fein- als auch die Schruppbearbeitung eingesetzt werden.

Die PKD-Schneide hat jedoch auch Nachteile, die den Einsatz nur unter gewissen Bedingungen bzw. gar nicht zulassen. Nachteile der PKD-Schneide sind beispielsweise folgende [11,15]:

- Der größte Nachteil von PKD-Werkzeugen ist, wie bereits zuvor erwähnt, deren hohe Affinität zu Eisen-Kohlenstoff-Legierungen (wie Gusseisen, Stahl etc.). Eine zerspanende Bearbeitung dieser ist nur unter gewissen Voraussetzungen möglich, die bereits in 2.3.2 beschrieben wurden.
- Die im Herstellungsprozess benötigten Katalysatormetalle können bei Temperaturen über 800°C eine innere Graphitisierung verursachen, wodurch es zu einer Verringerung der Festigkeit kommen kann.
- Die Biegefestigkeit von Diamant ist aufgrund dessen hoher Sprödigkeit und somit geringen Zähigkeit, im Gegensatz zu anderen Schneidstoffen, sehr gering.
- Ein weiterer Nachteil ist die geringe Temperaturbeständigkeit des Diamanten. Ab einer Zerspanungstemperatur von etwa 700°C kommt es zu einer thermischen Instabilität des Diamanten, die zu dessen Graphitisierung führt.

2.4 Kühlschmierung

2.4.1 Kühlschmierstoffe

In der Zerspanungstechnik haben Kühlschmierstoffe (KSS) die folgenden drei wesentlichen Aufgaben [7]:

- Der Kühlschmierstoff soll die Wärme, die im Zerspanungsprozess durch Reibung und Verformung auftritt, abführen.
- Der Schmiereffekt des Kühlschmierstoffes soll die Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück verringern.
- Der Kühlschmierstoff soll den Abtransport der Späne aus dem Zerspanungsbereich sicherstellen.

Zusätzlich zu den oben aufgezählten Aufgaben sollen Kühlschmierstoffe noch ungiftig, geruchsfrei, hautverträglich, alterungsbeständig, druckfest und problemlos zu entsorgen sein [7].

Die Kühlschmierstoffe werden nach der DIN 51385 in zwei Gruppen unterschieden; und zwar in nicht wassermischbare und wassermischbare. Die nicht wassermischbaren Kühlschmierstoffe sind in den meisten Fällen Mineralöle, welche mit Additiven gemischt werden, um die Druckfestigkeit zu steigern. Je schlechter sich ein Werkstoff zerspanen lässt, desto größer muss der Anteil von Additiven sein. Die wassermischbaren Kühlschmierstoffe können zu Öl-in-Wasser-Emulsion, Wasser in Öl-Emulsion oder zu einer Lösung mit Wasser gemischt werden. Je nach Anforderungen an den Kühlschmierstoff (Korrosionsschutz, Schmierwirkung) kann die Konzentration des Öles gesteigert werden.

Eine wichtige Aufgabe übernehmen die eingesetzten Additive, deren Anteil bis zu 30% ausmachen kann. Sie müssen die Schaumbildung, die Alterung durch Oxidation, Faulprozesse und bakterielle Zersetzungen verhindern [7].

Während des Zerspanungsprozesses können Reaktionsprodukte, Fremdstoffe und Mikroorganismen in den Kühlschmierstoff gelangen. Diese sollen bei der Pflege des Kühlschmierstoffes durch Filter und Kontrolle ihrer Zusammensetzung beseitigt werden. Bei einer ordnungsgemäßen Pflege kann der Einsatz von Kühlschmierstoffen Vorteile wie eine Standzeitverlängerung, Leistungssteigerung, Verbesserung der Oberflächengüte oder die Reduzierung der Zerspanungskräfte nach sich ziehen [7].

2.4.2 Überflutungskühlung

Die bereits oben genannten Aufgaben eines Kühlschmierstoffes (siehe 2.4.1) haben einen direkten Einfluss auf die Energieumsetzung und somit auch auf die Wärmedissipation sowie die Erwärmung der Werkzeugmaschine. Deshalb wird die Überflutungskühlung besonders bei Schneidwerkzeugen wie Werkzeugstahl und HSS, welche nur in einem begrenzten Temperaturbereich einsetzbar sind, angewendet. Ein weiteres Anwendungsgebiet für die Überflutungskühlung stellen die Trennverfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide dar. Bei diesen Verfahren wird grundsätzlich mehr thermische Energie freigesetzt, die schließlich aus der Bearbeitungszone abgeführt werden muss [7].

Beim Zerspanen mit temperaturbeständigen Schneidstoffen (Hartmetall, Keramik) ist der Einsatz von KSS nicht notwendig. Die wiederkehrende Aufheizung bzw. Abkühlung der Hartmetallschneide durch den Kühlschmierstoff (besonders beim Fräsen, da kein kontinuierlicher Schnitt) kann zu einer Kammrissbildung führen, wodurch das Werkzeug nicht mehr einsatzfähig ist. Die Anwendung von KSS bei kontinuierlichem Schnitt stellt jedoch keine Probleme dar [7].

Der Einsatz der Überflutungskühlung ermöglicht für HSS-Schneidstoffe eine Steigerung der Schnittgeschwindigkeit um 40% bei gleichbleibender Standzeit. Jedoch ist der Einsatz von KSS in der Fertigungstechnik immer wieder Gegenstand von Diskussionen, da ein wesentlicher Nachteil von gebrauchtem Kühlschmierstoff dessen hohes Umweltgefährdungspotenzial darstellt. Er muss daher nachträglich für die Entsorgung aufbereitet werden, was zusätzliche Kosten mit sich bringt. Eine Alternative zur Überflutungskühlung stellt die Kühlung mittels Druckluft dar, jedoch ist dabei die erreichbare Kühlwirkung deutlich geringer. Eine weitere Alternative ist die Trockenbearbeitung, bei der vollkommen auf den Einsatz von Kühlmedien verzichtet wird. Dank der fortschreitenden Entwicklung von Schneidstoffen und Beschichtungen kann für bestimmte Anwendungen heutzutage auf KSS verzichtet werden [7].

2.4.3 Minimalmengenschmierung (MMS)

Die Minimalmengenschmierung (MMS) bezeichnet das Kühlen bzw. vielmehr das Schmieren von Zerspanungsprozessen durch das Aufsprühen von minimalen Mengen an Schmierstoff zwischen dem Werkzeug und Werkstück. Für diese Art der (Kühl-)Schmierung sind im Gegensatz zur konventionellen Überflutungskühlung nur geringe Mengen an Schmierstoff (wenige Milliliter pro Stunde) für den Zerspanungsprozess notwendig. Durch den Einsatz von MMS wird über ein Öl-Luft-Gemisch (das sogenannte Aerosol) eine optimale Schmierung zwischen Werkzeug und Werkstück hergestellt. Dadurch soll die Entstehung von Reibungswärme vermindert werden. Die Minimalmengenschmierung (MMS) kann aufgrund ihrer Bezeichnung mit der Minimalmengenkühlschmierung (MMKS) verwechselt werden. Der Unterschied liegt darin, dass die Kühlwirkung des Schmierstoffs bei der MMKS höher ist, bei der MMS hingegen der Schmierstoff höhere Schmierfähigkeit besitzt [7,16]

Es konnte nachgewiesen werden, dass der Einsatz von MMS gegenüber Trockenzerspanung vorteilhafter ist. Besonders bei der Zerspanung von großen Standwegen l_f und größerem Vorschub lässt sich ein erkennbarer Unterschied in der Standzeit des Werkzeuges bemerken. Ebenfalls wurde festgestellt, dass die MMS-Zufuhr an unterschiedlichen Stellen des Werkzeuges verschiedene Auswirkungen hat; das Besprühen der Freifläche gegenüber der Spanfläche konnte laut [17] bessere Ergebnisse liefern.

Bei MMS-Geräten muss grundsätzlich zwischen einem Ein- und Zweikanalsystem unterschieden werden. Im Einkanalsystem wird das Öl-Luft-Gemisch in einem externen Gerät vorbereitet. Der Druckluft-Volumenstrom wird mit einer geringen Menge an Schmierstoff (z.B. 8 ml/h) gemischt. Die typischen Dosiermengen für MMS liegen zwischen 5 ml bis 50 ml pro Stunde. Das vorbereitete Aerosol wird über einem Kanal direkt an die Sprühdüse geleitet. Beim Zweikanalsystem wird der Schmierstoff (Öl) getrennt vom reinen Luftstrom über eine eigene Zuführleitung (daher der Name Zweikanalsystem) zum Mischkopf bzw. zur Sprühdüse transportiert. An der Sprühdüse zerreißt der Luftstrom das Öl in Kleinstpartikelwolken [7,16].

Ebenfalls wird zwischen äußerer und innerer Zufuhr des Aerosols zur Bearbeitungszone an Werkzeug bzw. Werkstück unterscheiden. MMS-Systeme mit äußerer Zufuhr eignen sich für das Nachrüsten von Werkzeugmaschinen; die notwendigen Sprühdüsen können mit wenig Aufwand am Spindelkopf angebracht werden. Die äußere Zufuhr eignet sich für den Einsatz bei einfachen Standardbearbeitungsprozessen (wie Drehen, Fräsen, Bohren und Sägen). Mittels innerer Zufuhr (also durch das Werkzeug und ggf. auch durch die Spindel) kann das Aerosol präziser an die Wirkstelle gebracht werden.

Dadurch werden auch Streu- und Sprühverluste minimiert. Die *Abbildung 2.23* zeigt das Prinzip eines Minimalmengensprühsystems mit Einkanalssystem und äußerer Zufuhr [16].

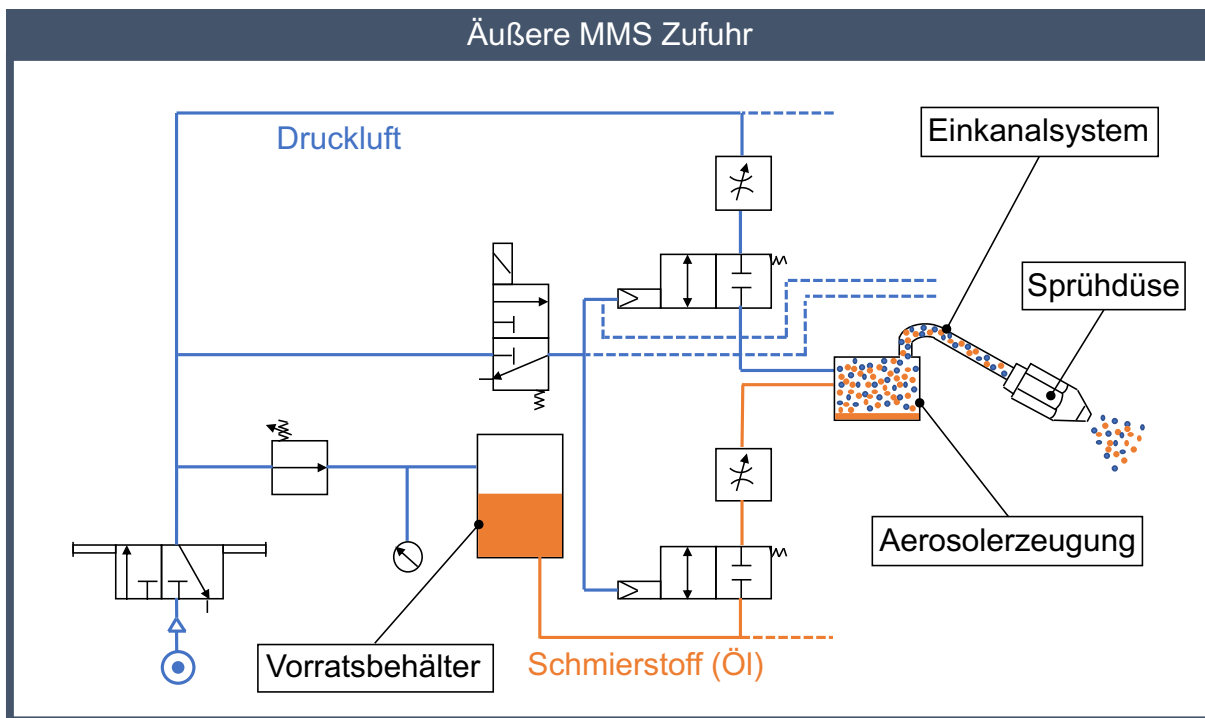


Abbildung 2.23: Prinzipielle Funktion einer Minimalmengenschmierung als Einkanalssystem und äußerer Zuführung, in Anlehnung an [18]

Die Umsetzung der MMS bringt gegenüber der konventionellen Überflutungsschmierung im Bereich Pflege, Überwachung, Wiederaufbereitung und Entsorgung des Schmierstoffes kostentechnische Vorteile. Nach statistischen Angaben betragen die Aufwände für Kühlschmierstoffe 8 bis 16 % der Gesamtkosten in der Nassbearbeitung. Die Vorteile der Minimalmengenschmierung seien nochmals übersichtlich zusammengefasst [16]:

- Eine deutliche Reduzierung der benötigten KSS-Menge im Einsatz.
- Der Aufwand für die Überwachung und die sogenannte Badpflege verringert sich.
- Die Entsorgung und Aufbereitung von verbrauchten KSS-Anteilen werden vermieden.
- Das problemlose Recycling der mit geringem Öl verunreinigten Späne.

Durch den Einsatz von MMS ergibt sich anwendungsbedingt die Zerstäubung des Schmierstoffes in der Werkzeugmaschine. Die Überwachung der Aerosolemission, der Stäube und Feinstäube, der Explosions- und Brandgefahr sowie der Lärmexposition wird beim Einsatz einer Minimalmengenschmierung vorausgesetzt [7,16].

Folgende Punkte müssen bei der Anwendung von MMS ganz besonders beachtet werden [7]:

- die bedarfsgerechte Dosierung mit Luft als Trägermedium
- die Zuführung und Düsentechnik
- die Steueranbindung des Gerätes
- die geeigneten Schmierstoffe.

2.5 Optische Messverfahren zur Werkzeugbeurteilung

2.5.1 Lichtmikroskopie

Mikroskope ermöglichen eine starke Vergrößerung von sehr kleinen Bauteilen und Objekten. Die Konstruktion moderner Mikroskope erfolgt nach dem Baukastensystem. Dadurch können Mikroskope je nach Mikroskopklasse mit unterschiedlicher Flexibilität und Ausbaumöglichkeiten gestaltet werden. Das Grundgerüst eines Lichtmikroskops wird als Stativ bezeichnet, welches wiederum aus drei Teilen besteht; einem Mikroskopfuß, einem Tobusträger bzw. Stativarm (als Säule zur Befestigung von Optik und der Objektisch) und einem Grob- und Feintrieb (Einstellräder zum Scharfstellen des Präparates). Alle weiteren Bestandteile zur Vergrößerung und Beleuchtung werden an diesem Grundgerüst montiert [19,20].

Mikroskope können sich zum einen hinsichtlich der angewendeten Beleuchtungstechnik (Durchlichtmikroskop oder Auflichtmikroskop) und zum anderen durch die unterschiedliche Bauweise (aufrechtes Mikroskop oder inverses Mikroskop) unterscheiden. Als Sonderfall kann noch das Stereomikroskop erwähnt werden [19].

Bei einem Durchlichtmikroskop muss das Präparat durchsichtig oder dünn geschnitten sein. Der Grund für diese Voraussetzung ist, dass das Licht von unten kommt und durch das Präparat verläuft, bevor es vom Objektiv gefangen wird. Bei einem Auflichtmikroskop (siehe *Abbildung 2.24*) hingegen können auch lichtundurchlässige oder sehr dicke Präparate verwendet werden. Dies kann dadurch erreicht werden, weil das Licht entweder von oben durch das Objektiv auf das Präparat geleitet oder von der Seite eingestrahlt (schräge Beleuchtung) wird. Das Auflichtmikroskop findet deshalb auch häufig Anwendung in der Fluoreszenzmikroskopie oder in den Materialwissenschaften [19].

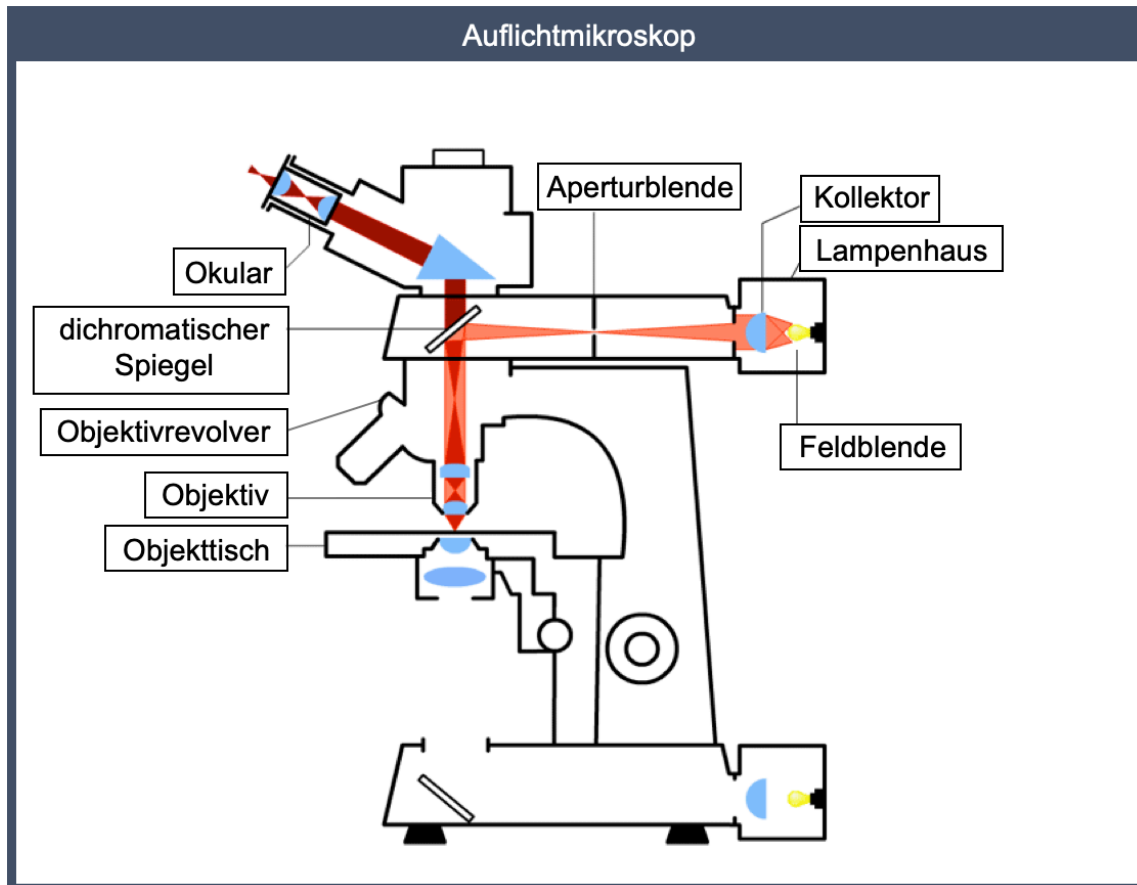


Abbildung 2.24: Aufbau eines Auflichtmikroskops [19]

2.5.2 Fokusvariation

Die Autofokusprinzipien aus der Kameratechnik haben auch Einzug in die Präzisionsmesstechnik gefunden. Mit Hilfe der Autofokusprinzipien können flächenhafte hochgenaue Topografiemessungen durchgeführt werden [21].

Beim Fokusvariationsverfahren benötigt das Messgerät eine Optik mit einer möglichst geringen Schärfentiefe. Mit dieser Optik wird eine Serie von Bildern in unterschiedlichem Abstand (der durch die Bewegung der Optik oder durch die Bewegung des Objektes erfolgen kann) aufgenommen. Durch die Serie von Aufnahmen erhält man einen Bilderstapel für jedes einzelne Bild, aus dem die „Scharfbereiche“ bestimmt werden. Aus der zugehörigen Bildposition ergibt sich die Lage der Scharfebene auf der Oberfläche. Somit kann in einem vertikalen Scan die gesamte Oberflächentopografie erstellt werden. Die hochgenaue Positionsbestimmung wird über die vertikale Präzisionsführung des Messgerätes erreicht. Durch die Verwendung von Objektiven mit möglichst großer numerischer Apertur hoher Vergrößerung ergibt sich eine geringe Schärfentiefe. Die Schärfe des Messgerätes wird über Bildverarbeitungsalgorithmen, die meist auf der Analyse des Kontrastes in Nachbarschaften basieren, definiert [21].

Das Messgerät ist auf Basis eines Mikroskops aufgebaut. Die Bewegung der betrachteten Werkstücke, sowie die Bewegung der Optik mit den dazugehörigen Komponenten erfolgt in vertikaler Richtung. Anhand eines Präzisionsmaßstabes (Glasmaßstab) wird die Position erfasst. Um qualitativ hochwertige Bilder zu erhalten, muss die Beleuchtung des Messgerätes auf den Anwendungsfall abgestimmt sein. Es gibt verschiedene Ausführungsmöglichkeiten der Beleuchtungseinheit wie koaxiale Beleuchtung, Ringlichtbeleuchtung, stroboskopische oder kontinuierliche Beleuchtung. Durch die Modulation der Beleuchtung können störende Umgebungseinflüsse oder unterschiedliche Reflexionsgrade an der Oberfläche des Werkstückes kompensiert werden. Der Aufbau eines Fokusvariation-Mikroskops wird in der *Abbildung 2.25* dargestellt [21].

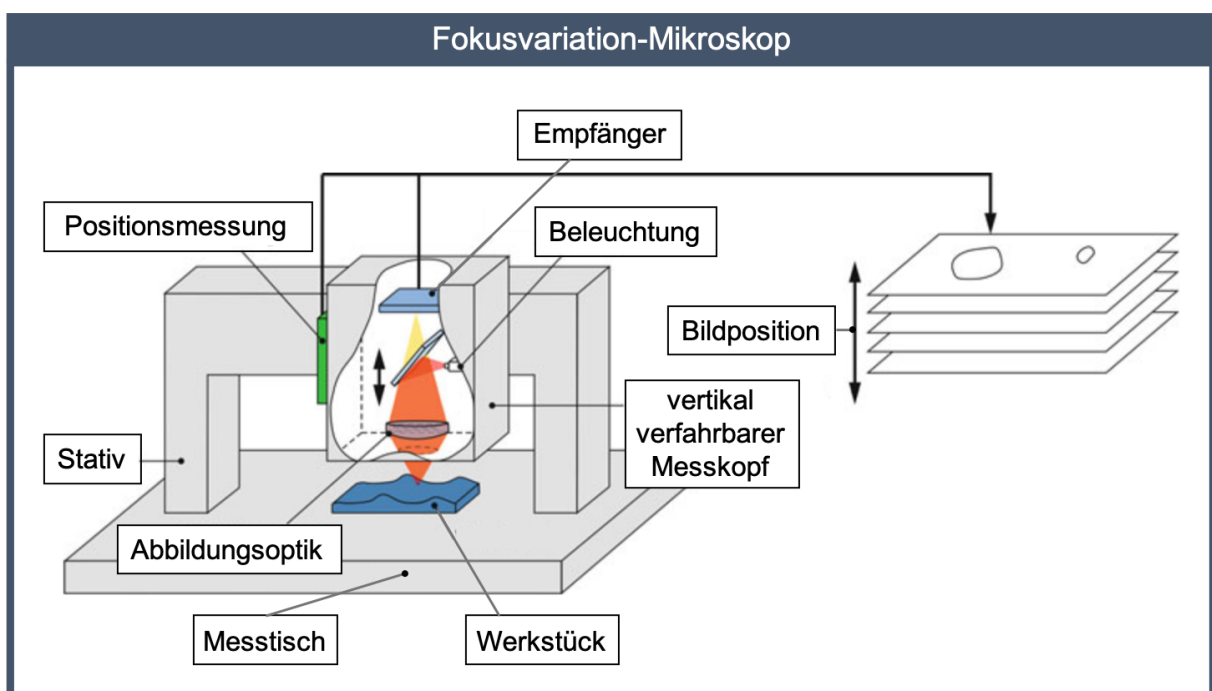


Abbildung 2.25: Aufbau eines Fokusvariation-Mikroskops [21]

Das Fokusvariationsverfahren findet Anwendung in allen Arten von Werkstück- und Oberflächenprüfungen wie z.B. Schneidkantenprüfung an Werkzeugen, Oberflächenprüfung nach der Bearbeitung, Messungen kleiner Strukturen an Oberflächen oder auch zur Bestimmung der Rauheitsparameter [21].

3 Zielsetzung

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist es, den Einsatz von PKD-Wendeschnidplatten bei der Feindrehbearbeitung von Eisen-Kohlenstoff-Legierungen durch die Entwicklung einer innovativen Kühlmethode, die mittels interner Kühlung der Wendeschnidplatte und externer Minimalmengenschmierung (MMS) umgesetzt wird, zu ermöglichen und somit das Einsatzgebiet von PKD (polykristallinem Diamant) als Schneidwerkstoff zu erweitern.

Da während dem Zerspanungsprozess in der Kontaktzone zwischen Werkstück und Werkzeug sehr hohe Temperaturen vorherrschen, ist der Einsatz von PKD-Wendeschnidplatten für die Zerspanung von Eisen-Kohlenstoff-Legierungen nur bedingt möglich. Ab einer Temperatur von 700°C kommt es zum sogenannten Diffusionsverschleiß in der Kontaktzone, der zum schnellen Versagen des Werkzeuges führt. Aufgrund der hervorragenden Wärmeleitfähigkeit von Diamant soll besonders durch die interne Kühlung der Wendeschnidplatte mit Kühlschmierstoff die Temperatur stabil unter 700°C gehalten werden, um die herausragenden Vorteile von PKD auch für die Zerspanung von Eisen-Kohlenstoff-Legierungen nutzbar zu machen.

Im Entwicklungsprozess der internen Kühlung sind verschiedene Geometrien für den Kühlkanal ausgelegt und konstruiert worden, welche anschließend in einer statisch-mechanischen Simulationsbetrachtung gegenübergestellt wurden. Nach Festlegung der Kühlkanalgeometrie wurden Strömungssimulationen durchgeführt, um einerseits den Kühlkanal strömungsoptimiert zu adaptieren und um andererseits die Wärmeentwicklung bzw. die vorherrschenden Temperaturen für den Zerspanungsprozess zu ermitteln. Abschließend wurde der Drehhalter – für den offenen Kreislauf der Innenkühlung – mit entsprechenden Zu- und Abführbohrungen versehen und der Kühlkanal mittels dem Verfahren des Senkerodierens in die Wendeschnidplatte eingearbeitet (siehe Kapitel 4/5/6).

Bei der experimentellen Untersuchung wurden neben der neu entwickelten Kühlmethode zwei weitere Kühlmethoden betrachtet und an verschiedenen PKD- und CBN-Sorten in variierenden Ausführungen umgesetzt. Unter Berücksichtigung der Herstellerempfehlung und der bereits in früheren Forschungsarbeiten eingesetzten Prozessparameter wurde die Parametereingrenzung durchgeführt, mit welchen letztlich die Schnittversuche zur Ermittlung der Effekte auf die Verschleißentwicklung durchgeführt wurden (vgl. Kapitel 6).

Die Auswertung der Versuchsergebnisse – die unter Zuhilfenahme von mikroskopischen Messgeräten ausgeführt wurde (siehe Kapitel 2.5) – sowie die Gegenüberstellung der angewendeten Kühlmethoden an diversen PKD-/CBN-Sorten werden im abschließenden Kapitel 7 präsentiert.

4 Konstruktive Auslegung

4.1 Interne Kühlung der Wendeschneidplatte

Die Kühlung des Werkzeugeingriffsbereiches bei spanender Bearbeitung kann durch externe Verfahren, wie Hochdruckkühlen oder kryogener Flüssiggaskühlung, welche bereits in der Industrie Anwendung finden, erfolgen. Eine sehr junge Technologie ist die Kühlung mithilfe eines internen Kühlkanals in der Wendeschneidplatte. Diese Kühlmethode hat sich besonders bei der parallelen Bearbeitung von Werkstoffverbunden aus Aluminium und Gusseisen, welche eine tribochemische Reaktion in Form einer Aufbauschneide an der Werkzeugschneide zur Folge haben kann, als sehr vorteilhaft erwiesen, da dadurch besagte intermetallische Verbindung vermieden werden konnte [23]. Des Weiteren konnten damit gute Ergebnisse hinsichtlich Werkzeugverschleiß bei der simultanen Bearbeitung des angesprochenen Werkstoffverbundes erzielt werden [22,24]. Ein Hindernis für die erfolgsversprechende interne Kühlungsmethode ist bisher die Akzeptanz in der Industrie. Die ordnungsgemäße und mit Kosten verbundene Entsorgung vom Kühlschmierstoff, das (derzeit noch nachträgliche) Einbringen des internen Kühlkanals in die Wendeschneidplatten sowie die fehlende Abführung des Spanes vom Eingriffsbereich durch eine externe Zufuhr des Kühlschmierstoffes stellen für den Einsatz in der Industrie aktuell noch Hindernisse dar [24].

Um die Einsatzmöglichkeiten der speziellen Kühlung mittels eines internen Kühlkanals für die Industrie zu erweitern und deren Funktionalität weiter zu verbessern, hat das *IFT der TU Wien* eine Kombination aus interner Kühlung und externer Kühlschmierung entwickelt (*Abbildung 4.1*). Durch das Verfahren des Senk-/Funkenerodierens (Electrical Discharge Machining – EDM) wurde in die Wendeschneidplatte ein strömungsoptimierter Kühlkanal eingearbeitet. Des Weiteren wurde eine Werkzeugaufnahme entwickelt, die für den Zu- und Abfluss des internen Kühlschmierstoffkreislaufs sorgt und dazu eine Überflutungskühlung ermöglicht [24].

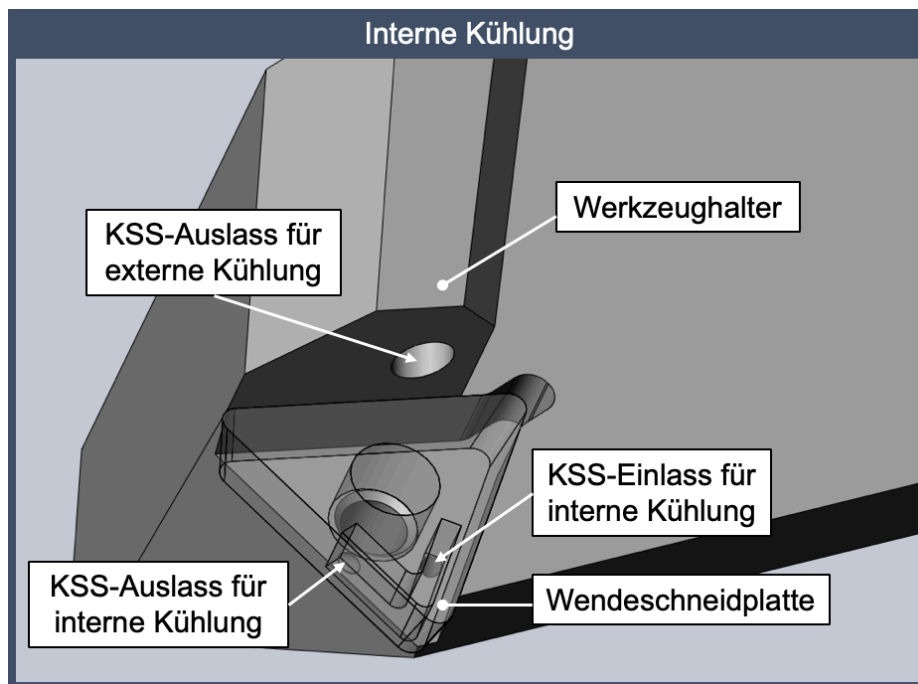


Abbildung 4.1: Werkzeughalter mit externer Kühlung und intern gekühlter Wendeschneidplatte, in Anlehnung an [24]

Die Forschungsergebnisse des IFT haben gezeigt, dass bei der Bearbeitung des Werkstoffverbundes (Grauguss-Aluminium) bei unterschiedlichen Kühlungsstrategien, aber mit gleichbleibenden Prozessparametern, Unterschiede hinsichtlich Werkzeugverschleiß und Wärmeeinbringung festzustellen sind. Dabei wurde einerseits die Bearbeitung mit alleiniger externer Kühlung durchgeführt und andererseits die Kombination aus externer und interner Kühlung mit unterschiedlichen Durchflussraten für die interne Kühlung zur Bearbeitung verwendet. Die kombinierte Kühlung führte zu einer geringeren Wärmeeinbringung an der Freifläche und demzufolge auch zu einer Verringerung des Freiflächenverschleißes gegenüber der Kühlungsstrategie mit nur externer Kühlung [24].

Eine weitere Forschungsarbeit am IFT konnte wiederum die Vorteile bezüglich des Werkzeugverschleißes aus der Kombination der internen und externen Kühlung gegenüber der herkömmlichen externen Kühlung nachweisen. Für die simultane Bearbeitung einer sog. LDS-Schicht (lichtbogendrahtgespritzte Verschleißschicht auf Cobalt-Chrom-Basis) und Aluminium, wurden folgende Schnittparameter angewendet; Schnittgeschwindigkeit $v_c = 134$ m/min, Vorschub $f = 0,2$ mm/U und Schnitttiefe $a_p = 0,9$ mm. Die in der Arbeit festgelegte maximale Verschleißmarkenbreite (VB) von $220 \mu\text{m}$ an der Freifläche wurde als Vergleichswert herangezogen. Es konnte hierbei festgestellt werden, dass die externe Kühlung nach bereits 90 Bearbeitungsschritten, wobei jeder Bearbeitungsschritt eine Zustellung (a_p) von $0,9$ mm und eine Schnittlänge von $3,4$ mm besitzt, die Verschleißgrenze erreicht.

Die Kombination aus externer und interner Kühlung erreichte die Verschleißgrenze hingegen erst nach 180 Bearbeitungsschritten. Zu dem Ergebnis konnte noch der Kerbverschleiß an der Schneidkante durch die kombinierte Kühlungsstrategie vermieden werden [22].

4.2 Kombination aus interner Kühlung und externer Minimalmengenschmierung

In dieser Arbeit wurde für die Umsetzung der geplanten Kombination aus interner Kühlung und externer Minimalmengenschmierung der Wendeschneidplatte ein Werkzeughalter der Fa. ISCAR verwendet. Die genaue Typenbezeichnung des Werkzeughalters lautet „PCLCR/L 2020K-09S-JHP“. Dieser Werkzeughalter (*Abbildung 4.2*) ist mit einer Sprühdüse ausgestattet, die intern durch den Drehhalter gespeist wird und über drei Anschlussmöglichkeiten am Schaft verfügt. Mit Hilfe dieser Sprühdüse soll das MMS außen an den Eingriffsbereich zugeführt werden, genauer gesagt auf die Spanfläche der Wendeschneidplatte, und damit sowohl für geringe Reibung als auch geringe Wärmeentwicklung zwischen Werkzeug und Werkstück sorgen.

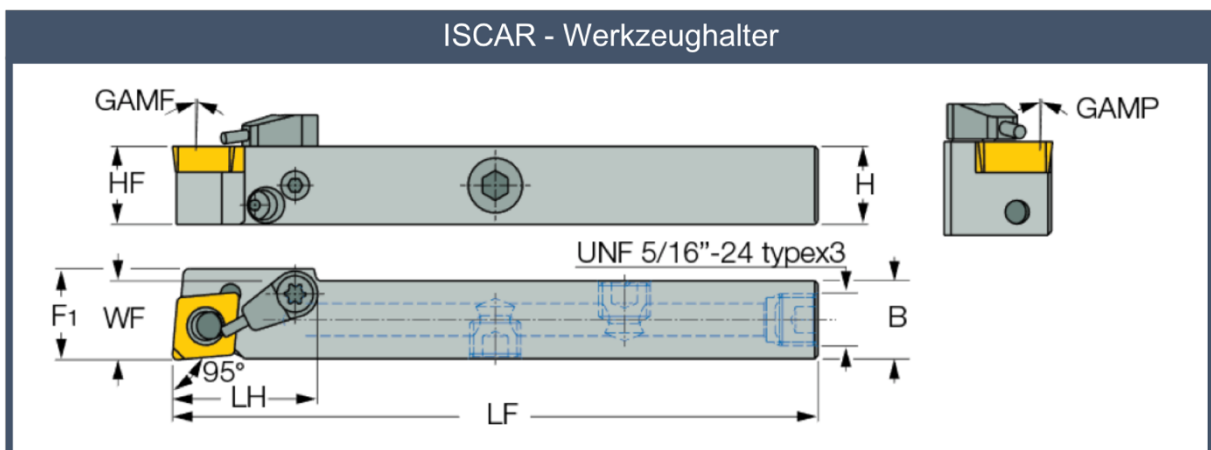


Abbildung 4.2: Werkzeughalter der Fa. ISCAR vom Typ PCLCR/L 2020K-09S-JHP, Ausführung mit Sprühdüse [25]

Die konstruktive Gestaltung des Werkzeughalters mit den notwendigen Bohrungen für die Zu- und Abfuhr des Kühlschmierstoffes zum internen Kühlkanal in die Wendeschneidplatte war Teil der vorliegenden Abschlussarbeit. Da bereits Bohrungen für die Sprühdüse und für den Kniehebelmechanismus zur Befestigung der Wendeschneidplatte im Werkzeughalter vorhanden waren, wurden drei verschiedene Zu- und Abfuhrmöglichkeiten der internen Kühlung durch den Werkzeughalter konstruiert und in Erwägung gezogen. Die in den *Abbildungen 4.3 bis 4.5* dargestellten Ausführungen der Zu- und Abflussbohrungen des Kühlschmierstoffes wurden zu diesem Zwecke konstruiert.

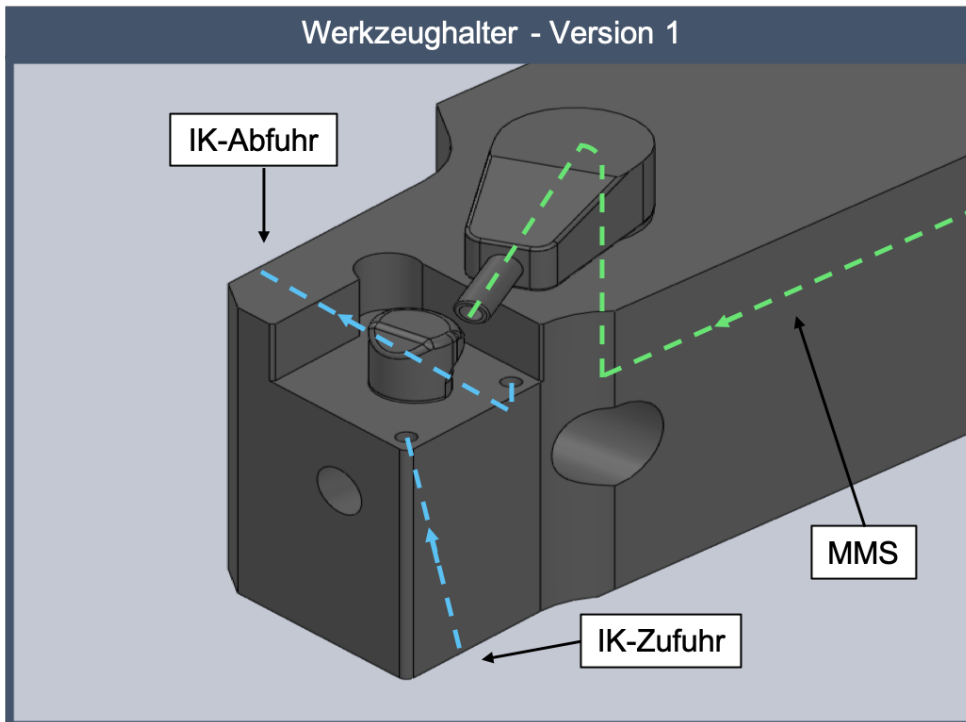


Abbildung 4.3: Werkzeughalter - Version 1, mit interner Kühlung (IK) und MMS-Zuführung

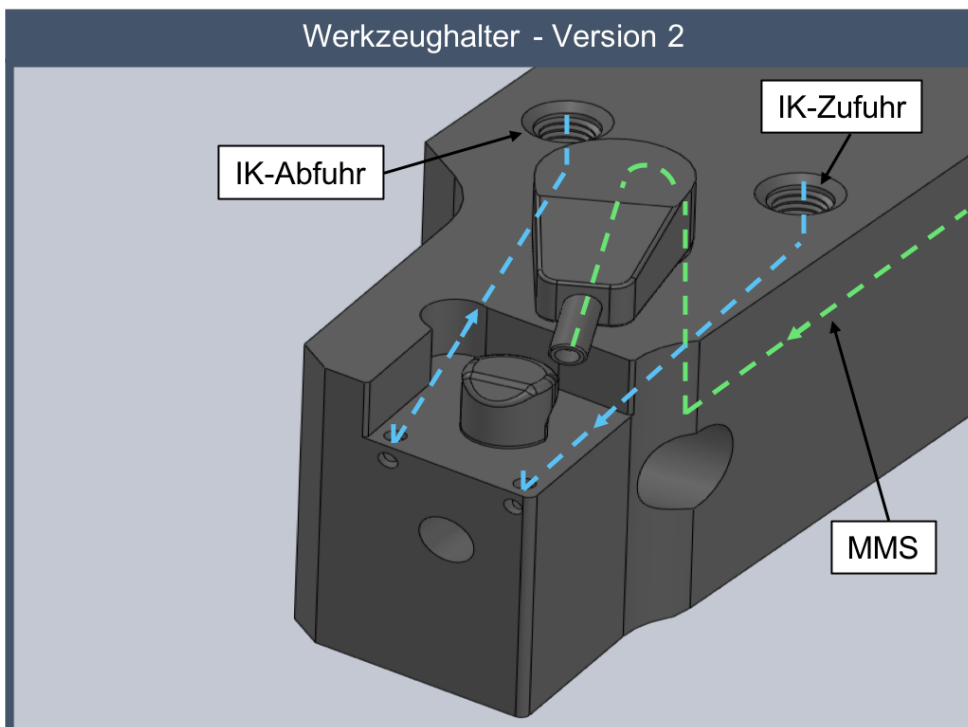


Abbildung 4.4: Werkzeughalter - Version 2, mit interner Kühlung (IK) und MMS-Zuführung

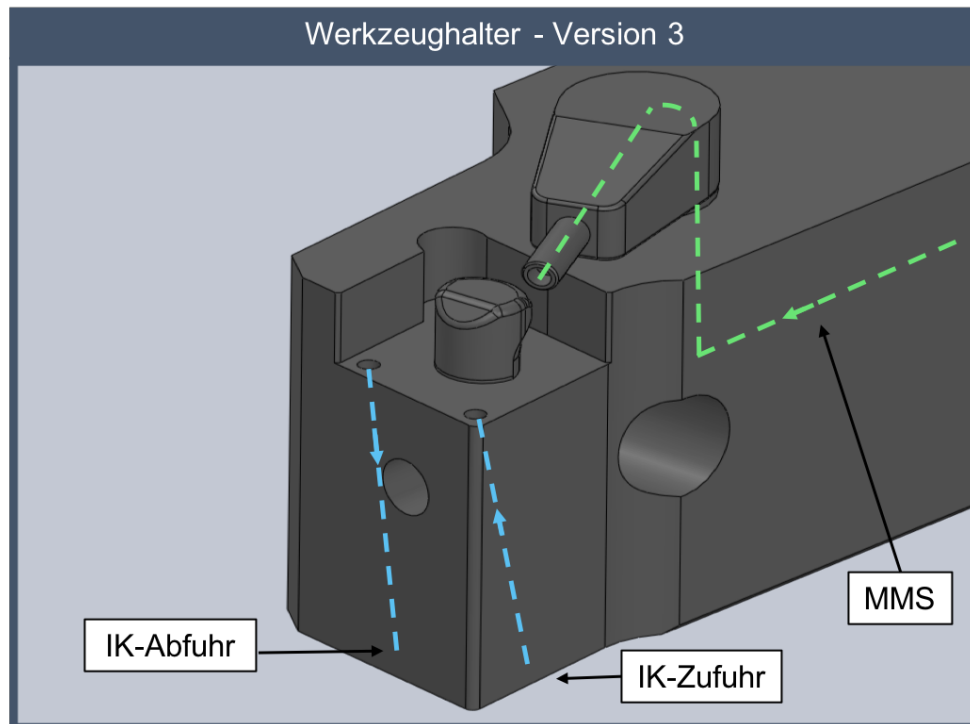


Abbildung 4.5: Werkzeughalter - Version 3, mit interner Kühlung (IK) und MMS-Zuführung

Bei der Auswahl der entwickelten Werkzeughalterversionen wurde auf mögliche Komplikationen, die während der Fertigung auftreten könnten, Rücksicht genommen. Eine dieser Komplikationen ist das schräge Ansetzen des Bohrers auf die Bearbeitungsebene. Dadurch kann es bei relativ kleinen Bohrungsdurchmessern, wie sie hier notwendig sind, zu Ungenauigkeiten des Bohrungsausganges kommen, die somit einen optimal geschlossenen Kreislauf bzw. die unbeeinträchtigte Strömung des Kühlschmierstoffs der Innenkühlung durch die Wendeschneidplatte verhindern würden.

Eine weitere Schwierigkeit, die bei der Auswahl berücksichtigt werden musste, war die optimale Positionierung der Zu- und Abfuhranschlüsse am Schaft des Drehhalters. Unter Berücksichtigung der vorgegebenen Werkzeughaltergeometrie musste zum einen ausreichend Platz für ein M3-Gewinde an der jeweiligen Position für den Anschluss gegeben sein, und zum anderen die Abführung der Leitungen aus der Bearbeitungszone ermöglicht werden.

Unter Beachtung der oben genannten Kriterien fiel die Wahl auf den „Werkzeughalter - Version 1“. Da in allen drei Versionen die Bohrung für die IK-Zuführung schräg auf die Bearbeitungsebene angesetzt werden musste, allerdings beim „Werkzeughalter - Version 1“ als einzige Ausnahme die Bohrung für die IK-Abführung normal auf die Bearbeitungsebene steht, wurde dies als wesentlicher Grund für die getroffene Entscheidung identifiziert. Ebenfalls erfüllte jene Version die einfache Anbindung und Verlegung der Anschlussleitungen aus der Bearbeitungszone und bietet reichlich Platz für die Anschlüsse über ein M3-Gewinde am Schaft des Drehhalters.

Eine weitere wesentliche, konstruktive Aufgabenstellung der vorliegenden Abschlussarbeit ist die geometrische Gestaltung des Kühlkanals der Wendeschneidplatte, welcher in exakter Abstimmung zu den Bohrungen im Drehhalter (den Versorgungsbohrungen für den internen Kühlkanal) zu erfolgen hatte. Im Rahmen der Ausarbeitung wurden verschiedenste Versionen eines möglichen Kühlkanals in der Wendeschneidplatte (siehe *Abbildung 4.6* bis *4.12*) entworfen und simulativ gegenübergestellt. Grundsätzlich wurde bei der Konstruktion darauf geachtet, dass der Kühlkanal nur entlang einer Schneidkante verläuft, damit die Stabilität der Wendeschneidplatte durch das Entfernen des Materials nicht zu sehr in Mitleidenschaft gezogen wird.

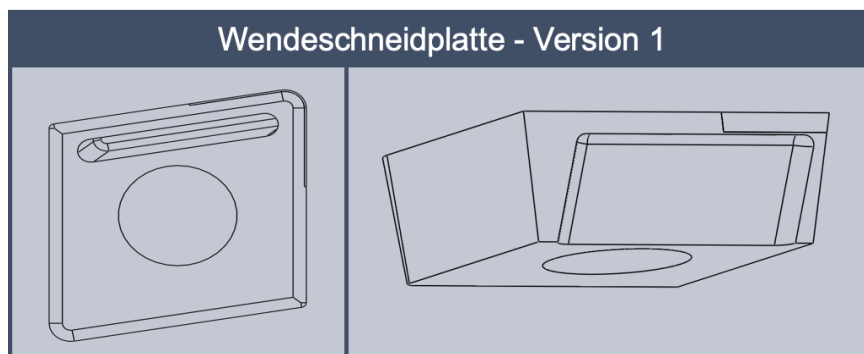


Abbildung 4.6: Kühlkanal der WSP-Version 1

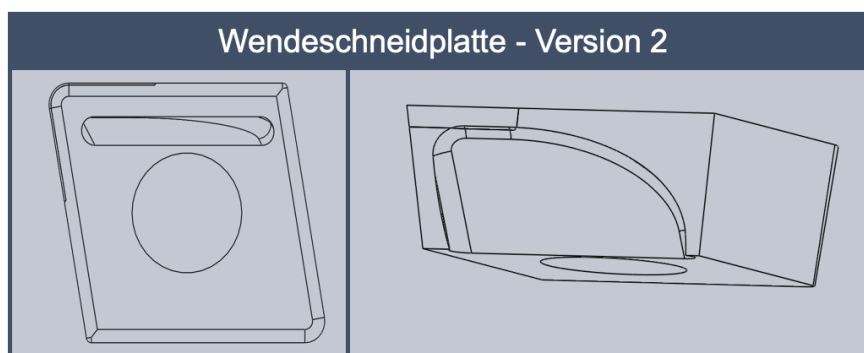


Abbildung 4.7: Kühlkanal der WSP-Version 2

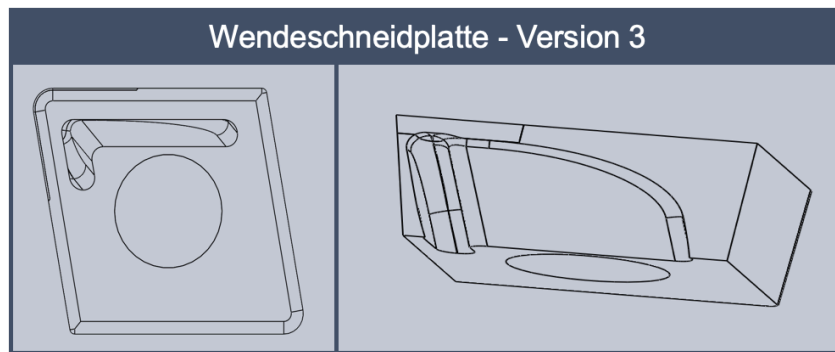


Abbildung 4.8: Kühlkanal der WSP-Version 3

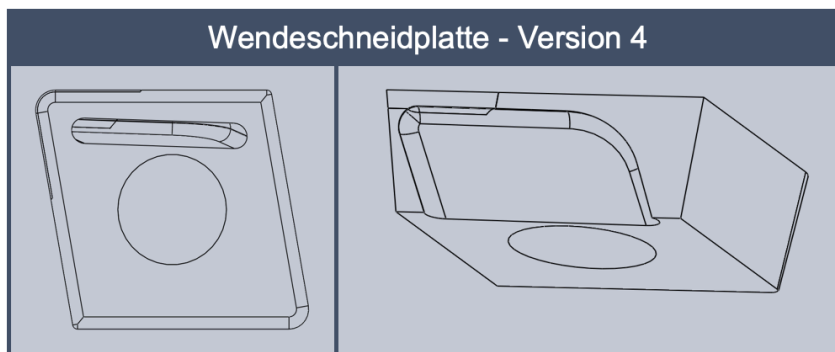


Abbildung 4.9: Kühlkanal der WSP-Version 4

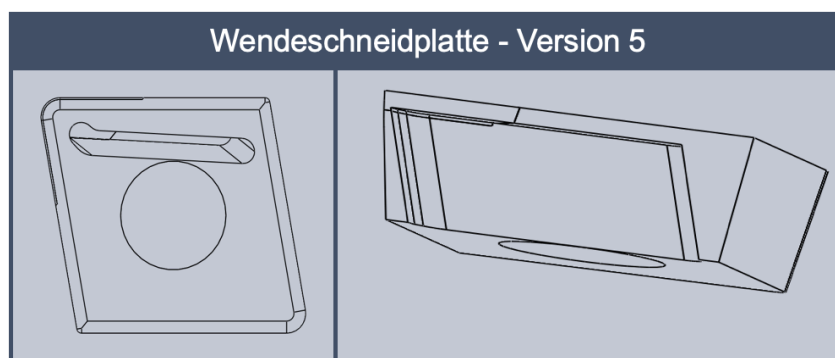


Abbildung 4.10: Kühlkanal der WSP-Version 5

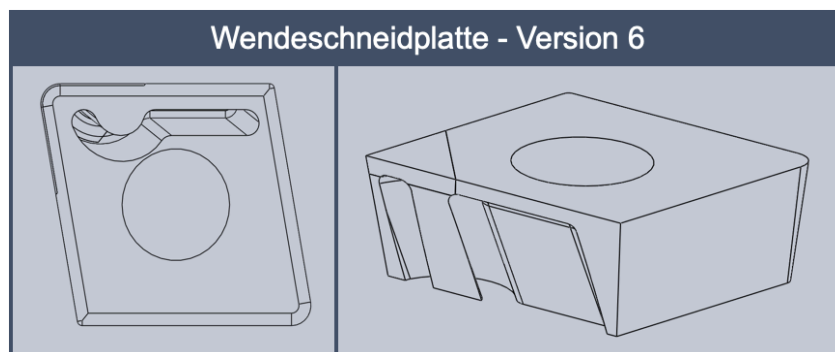


Abbildung 4.11: Kühlkanal der WSP-Version 6

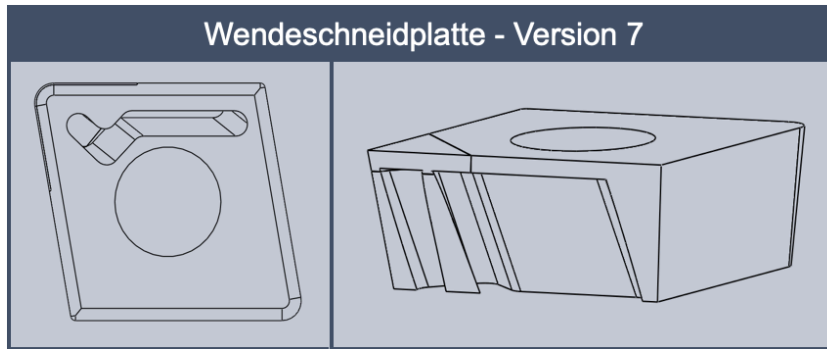


Abbildung 4.12: Kühlkanal der WSP-Version 7

Die Auswahl des Kühlkanals wurde mittels statisch-mechanischer Simulationen in der Software ANSYS getroffen, wobei die Simulationsergebnisse im Kapitel 5.3 dokumentiert sind. Demzufolge hat die Auswahl ergeben, dass die „Wendeschneidplatte - Version 2“ sich am besten für die Weiterführung dieser Arbeit eignet.

4.3 Finale Geometrie des internen Kühlkanals

Die Geometrie der „Wendeschneidplatte - Version 2“ wurde nach der getroffenen Auswahl mittels einer Strömungssimulation weiter angepasst und strömungstechnisch verfeinert bzw. optimiert. Die Form des Kühlkanals und die Rundungen an der Innenfläche wurden so abgestimmt, dass es beim Einsatz und dem Fluten des Hohlraumes mit KSS nicht zu sogenannten „Totstellen“ (Bereiche, an denen sich die Kühlflüssigkeit mit deutlich geringerer Strömungsgeschwindigkeit bewegt) kommen kann. Der Kühlkanal hat eine Breite von 1,1 mm bei einer Länge von 7,7 mm. Die Tiefe des Kühlkanals ist von der PKD- bzw. CBN-Blankdicke abhängig. Der Kühlkanal soll durch den Hartmetallgrundkörper (Dicke von 2,6 mm bis 3,4 mm, abhängig von der Blankdicke) bis 0,2 mm in das jeweilige Blank erodiert werden. Bei einer Gesamtdicke der Wendeschneidplatte von 4 mm kann die maximal Tiefe des Kühlkanals, abhängig von der Blankdicke, zwischen 3 mm und 3,5 mm variieren.

Durch die Kontaktfläche mit dem PKD-Blank über den erodierten Kühlkanal kann die hervorragende Wärmeleitfähigkeit des PKD-Blanks zur effizienteren Kühlung der Wendeschneidplatte an der Eingriffsstelle und dem Abtransport der entstehenden Prozesswärme vom Werkstück durch das Werkzeug genützt werden (Abbildung 4.13).

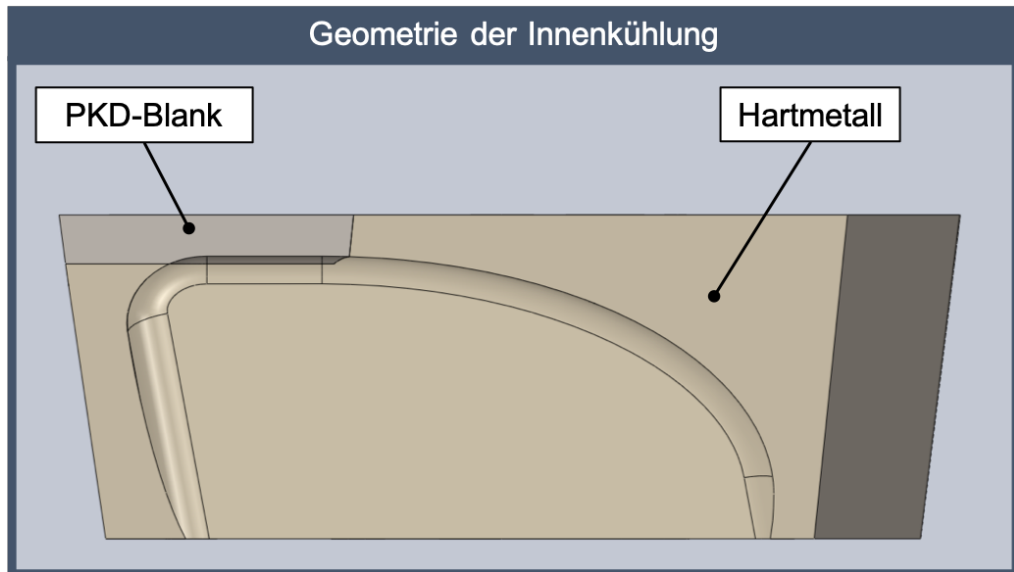


Abbildung 4.13: Konstruktive Darstellung des Kühlkanals im PKD-Blank

Die aufgrund der Zerspanung entstehende Temperaturentwicklung erreicht ihr Maximum an der Schneidenecke. Somit muss der Kühlkanal unter Berücksichtigung der Stabilität der Wendeschneidplatte so nahe wie möglich an die Schneidkante bzw. die Schneidenecke herangeführt werden. Um eine möglichst effektive Kühlung zu erreichen, wurde deshalb der Kühlkanal mit einem Winkel von 11° zur Freifläche konstruiert. Wie auch in *Abbildung 4.14* ersichtlich ist, kann der Kühlkanal aufgrund seiner flacheren Neigung zur Spanfläche (im Vergleich zu jener der Freifläche) näher an der Schneidkante platziert werden, um eine zusätzliche Verbesserung der Kühlwirkung an der Schneidenecke bei gleichbleibender mechanischer Beständigkeit der Grundstruktur der Wendeschneidplatte zu erreichen.

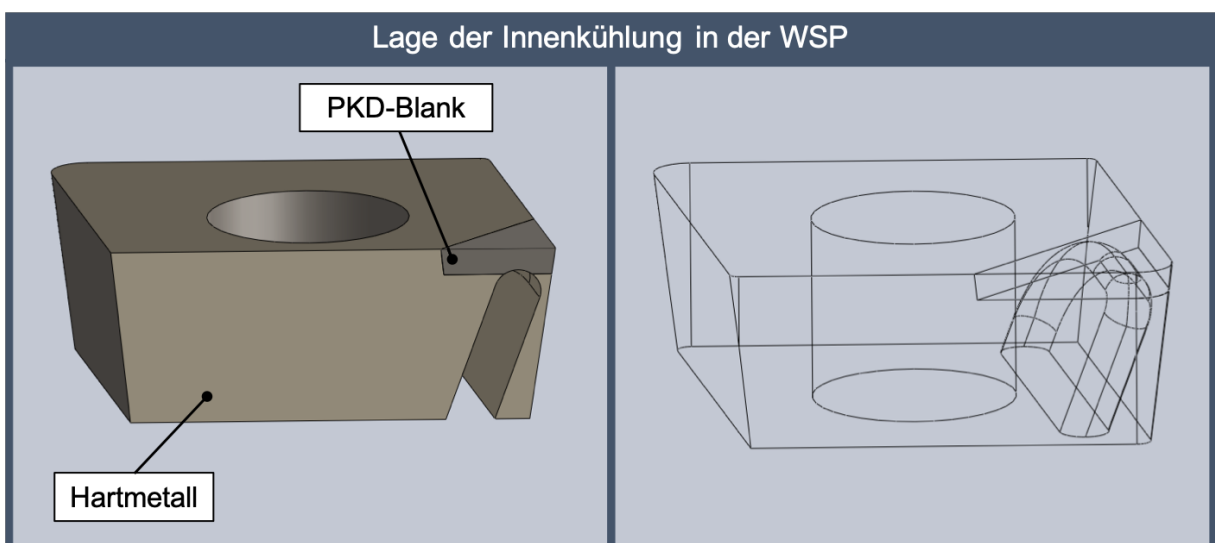


Abbildung 4.14: Schnittdarstellung (links); Drahtdarstellung des Kühlkanals unter einem Winkel von 11° zur Freifläche (rechts)

Damit der Fluidübergang der Zu- und Abfuhr der Innenkühlung vom Werkzeughalter zur Wendeschneidplatte ohne Komplikationen stattfinden kann, wurde für die vorzusehenden Bohrungen im Werkzeughalter ein Durchmesser von 1 mm gewählt. Der Kühlkanal in der Wendeschneidplatte ist 1,1 mm breit konstruiert worden. Es kommt somit zu einer Überlappung der Bohrungen durch den Kühlkanal in der Wendeschneidplatte (siehe *Abbildung 4.15*). Dadurch kann der Kühlschmierstoff nach dem Verlassen der Zuführbohrung des Werkzeughalters über die Kontur des Kühlkanals in der Wendeschneidplatte zur Austrittsbohrung im Werkzeughalter fließen und den KSS-Kreislauf zur adäquaten Kühlung der Wendeschneidplatte sicherstellen.

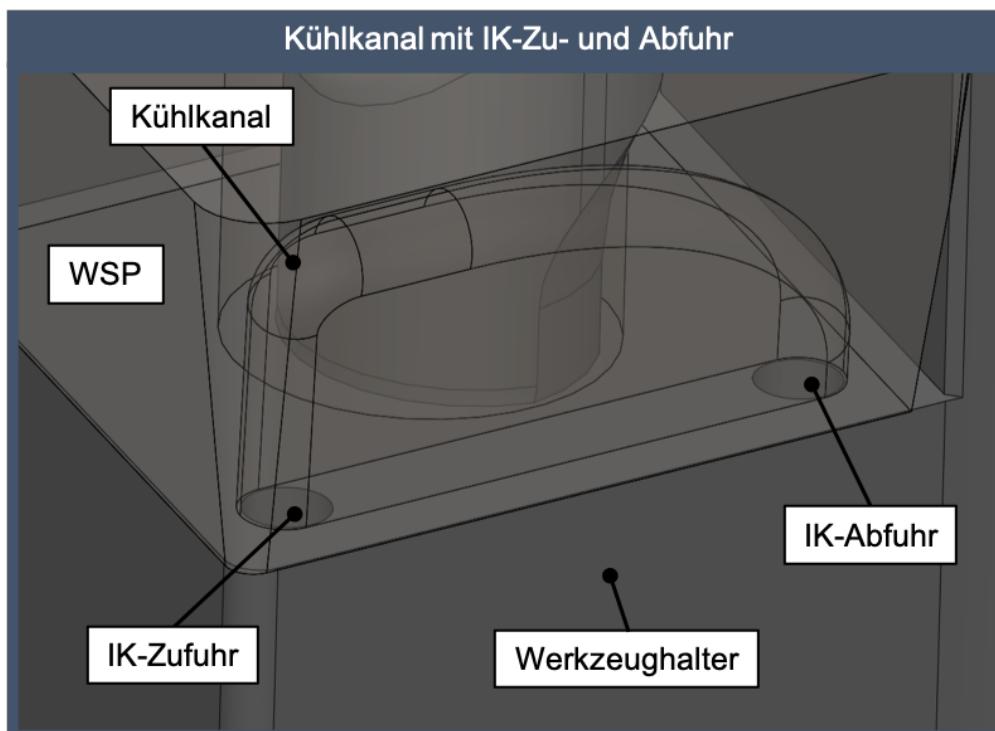


Abbildung 4.15: Übergang des Kühlkanals vom Werkzeughalter in die Wendeschneidplatte (WSP)

Die Zusammenstellungszeichnung des Werkzeughalters mit der Wendeschneidplatte und den Anschlüssen (Steckverschraubungen) für die Zu- und Abführung des Kühlschmierstoffes wird in *Abbildung 4.16* dargestellt.

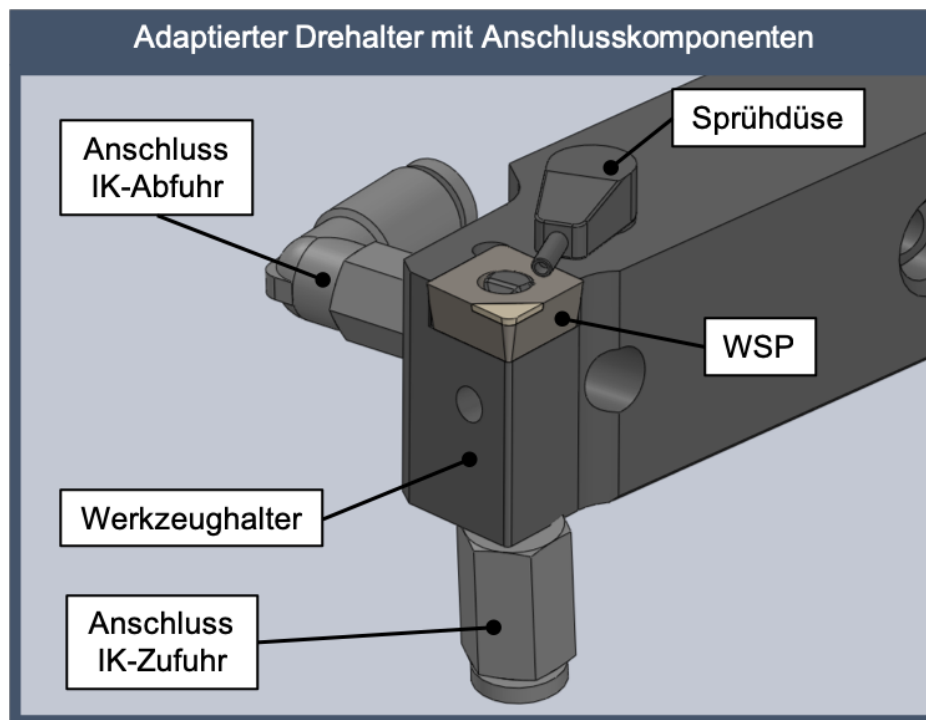


Abbildung 4.16: Darstellung der Anschlüsse für die Innenkühlung und der Sprühdüse für die Minimalmengenschmierung (MMS) am Drehhalter

5 Modellbasierte Simulationen

5.1 Finite-Elemente-Methode – FEM

Die Finite-Elemente-Methode ist ein numerisches Verfahren mit deren Hilfe Näherungslösungen von kontinuierlichen Feldproblemen berechnet werden kann. Der ursprüngliche Anwendungsbereich der FEM war zunächst das Lösen von Spannungsproblemen in der Strukturmechanik, jedoch wurde der Einsatzbereich weiter ausgedehnt und umfasst heute auch die Kontinuumsmechanik [3].

Die Grundidee der Methode ist es, das Werkstück bzw. das Objekt in endlich viele Teilgebiete (finite Elemente) zu unterteilen. Dabei werden Typ, Anzahl, Größe und Verteilung der Elemente festgelegt. Anhand der Vernetzung über sogenannte Elementtypen können alle Normal- und Schubspannungen im Werkstück erfasst werden. Die vollständige Definition eines Elementtyps wird über die Elementform, die Anzahl der Knoten, die Art der Knotenvariablen und der Interpolationsfunktion festgelegt. In *Abbildung 5.1* werden die verschiedenen Elementtypen zur Diskretisierung von Kontinuumsproblemen dargestellt [3,26].

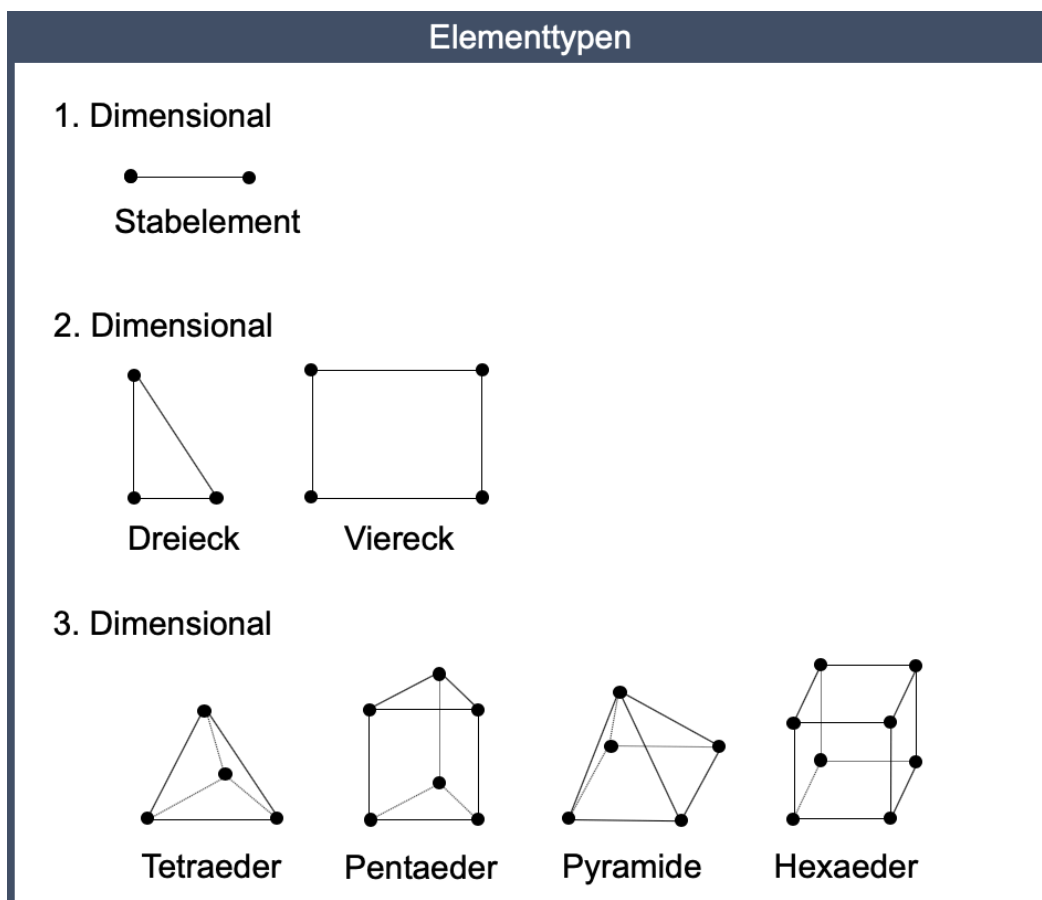


Abbildung 5.1: Darstellung der verschiedenen Elementtypen, in Anlehnung [3]

Die Interpolationsfunktion wird für die Annäherung des Verlaufes der Zustandsgröße innerhalb eines Elementes benötigt. Aufgrund der Differenzierbarkeit bzw. Integrierbarkeit, werden als Interpolationsfunktionen häufig Polynome verwendet. Die Ordnung der Polynome hängt von der Anzahl der Elementknoten, der Anzahl der Unbekannten eines jeden Knotens sowie den Kontinuitätsbedingungen an den Knoten ab. Im Gegensatz zu den klassischen direkt Verfahren der Variationsrechnung (Ritz- oder Galerkin-Verfahren), wo sich die Interpolationsfunktion (Ansatzfunktionen) über das gesamte Gebiet ausstreckt, werden bei der FEM Interpolationsfunktionen gewählt, bei denen eine Lösung zunächst für jedes einzelne finite Element formuliert wird. Durch die Auswahl der Interpolationsfunktionen und der Auswahl der Elementtypen, werden die Elementsteifigkeitsmatrizen bestimmt. Diese beschreiben die Zusammenhänge zwischen den primären Unbekannten (Geschwindigkeit, Verschiebung etc.) und den sekundären Unbekannten (z.B. Spannungen) [3,26].

Um anschließend das Steifigkeitsverhalten der Gesamtstruktur zu erhalten, werden die Elementsteifigkeitsmatrizen zu einer gesamten Steifigkeitsmatrix überlagert. Mit Unterberücksichtigung der geometrischen Randbedingungen (z.B. Einspannung) und Belastungen (äußere Kräfte) ergibt sich dann aus der gesamten Steifigkeitsmatrix ein lineares Gleichungssystem. Durch das Lösen der Unbekannten im Gleichungssystem, erhält man die Verformung an den Knotenpunkten. Somit kann unter Verwendung der Interpolationsfunktion und der Verformung, jede Spannung an den einzelnen finiten Elementen berechnet werden. Die erforderlichen Prozessschritte für die Näherungslösung mittels FEM werden in der *Abbildung 5.2* dargestellt [3,26].

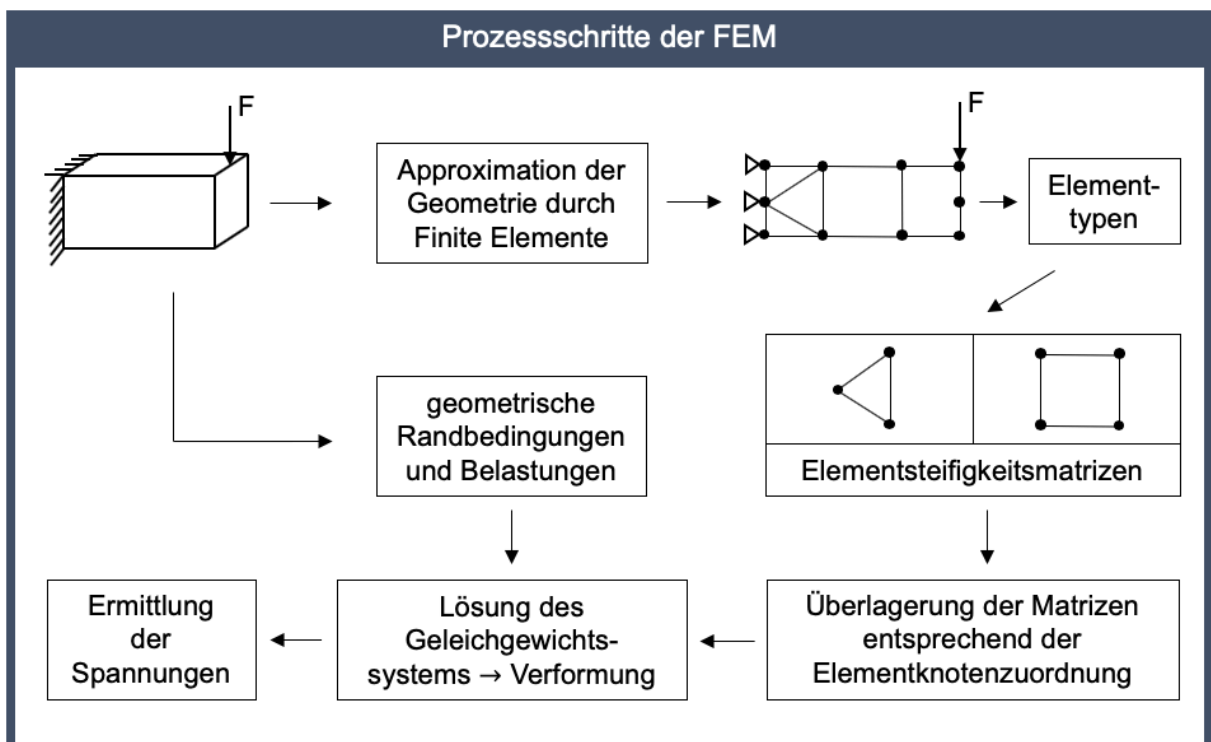


Abbildung 5.2: Ablauf der FEM an einem Kragbalkenbeispiel, in Anlehnung an [26]

5.2 Simulationen mit ANSYS

Mithilfe der Simulationssoftware ANSYS (Abkürzung für ANalysis SYStems) wurden sowohl die auftretenden mechanischen Belastungen als auch die thermischen Belastungen auf die Wendeschneidplatte simuliert. Die Ergebnisse aus der Simulation haben den Fortlauf der Arbeit in klaren Zügen geprägt.

ANSYS ist eine Finite-Elemente-Software, welche durch das Unternehmen *Ansys Inc.* entwickelt wurde. Diese Software ermöglicht unter anderem Strukturanalysen (Strukturmechanik), Temperaturberechnungen (thermische Probleme) einschließlich von Wärmestrahlung, Magnetfeldberechnungen, elektrische Felder, Elastizitätsprobleme, Viskosität, Kontaktrechnungen, Fluidanalysen und vieles mehr. Es werden fast alle gängigen CAD-Systeme unterstützt und über Schnittstellen der Import der konstruierten CAD-Modelle in die Software ermöglicht. Anschließend wird das CAD-Modell von der Software automatisch vernetzt, die geeigneten Parameter definiert und die Berechnung durchgeführt.

Um die mechanischen Belastungen an der Wendeschneidplatte zu simulieren, musste zunächst der Spannungsquerschnitt mit den definierten Spannungsgrößen (Zustellung a_p und Vorschub f) auf der Spanfläche skizziert werden. Über diese skizzierte Fläche wurde die zuvor errechnete Schnittkraft eingeleitet. Durch geeignete Auswahl der Elementtypen, welche besonders am Werkzeugeingriffsbereich feiner skaliert wurden, ist die Vernetzung der Wendeschneidplatte durch die Software automatisch erstellt worden. Es gilt zu beachten, dass bei einem zu feinen Netz lange Rechenzeiten resultieren. Deshalb ist eine optimale Feinheit des Netzes zu wählen, bei der die Rechenzeit kein unwirtschaftliches Maß annimmt und die gewünschte Genauigkeit der Simulationsergebnisse erreicht wird. Um die Gesamtverformung anhand eines homogenen Gefüges besser zu vergleichen, wurde bei der Simulation der verschiedenen Versionen der Wendeschneidplatte sowohl für den Grundkörper als auch für den Schneidwerkstoff als Simulationsmaterial Baustahl ausgewählt. Da der Grundkörper der Wendeschneidplatte aus Hartmetall (Wolframcarbid) und der Schneidwerkstoff aus einem PKD-Blank besteht, wurden diese Materialparameter nachträglich in die ANSYS-Materialbibliothek eingefügt und für die getroffene Version der Wendeschneidplatte eingestellt.

Mit Hilfe der Strömungssimulation wurde die Temperatur, welche während des Zerspanungsprozess auftreten kann, simuliert. Für die Simulation wurde die bereits statisch-mechanisch analysierte Wendeschneidplatte herangezogen und mit geeigneten finiten Elementen vernetzt. Die Schnittleistung P_c , die zuvor errechnet wurde, ist für die Strömungssimulation die zu berücksichtigende Wärmequelle. Sie muss für die Realisierung des Einsatzes von PKD über die entwickelte

Kühlungsstrategie abgekühlt und innerhalb bestimmter Temperaturgrenzen gehalten werden. Da die MMS hauptsächlich die Reibung zwischen dem Werkstück und dem Werkzeug verringern soll, ist ihre Implementierung in die Strömungssimulation nicht möglich.

5.2.1 Berechnung der erforderlichen Daten

Die errechnete Schnittkraft F_c , welche als einzige äußere mechanische Belastung auf die Wendeschneidplatte wirkt, wurde mit Hilfe folgender Tabellen (siehe *Tabelle 5.1* bis *5.4*) berechnet.

Drehzahl n	954,9 U/min
Schnittgeschwindigkeit v_c	180 m/min
Vorschub f	0,28 mm/U
Schnitttiefe a_p	0,3 mm
Einstellwinkel κ	95°
Spanwinkel γ	0°

Tabelle 5.1: Prozessparameter

Spanungsbreite b	0,3012 mm
Spanungsdicke h	0,2789 mm

Tabelle 5.2: Mittels Formel 2.2 und Formel 2.3 berechnete Werte für die Spanungsbreite b und die Spannungstiefe h

Spanwinkelkorrekturfaktor $K_{\gamma, \gamma_0=2^\circ}$	1,03
Schnittgeschwindigkeitskorrekturfaktor $K_{v, v_c > 100}$	0,8
Schneidstoffkorrekturfaktor K_{sch}	0,9
Verschleißkorrekturfaktor K_{ver}	1,3

Tabelle 5.3: Angabe der Korrekturfaktoren, aus [2]

Bezugswert der spez. Schnittkraft $k_{c1.1}$	1229 N/mm ²
Werkstoffkonstante m_c	0,28

Tabelle 5.4: Bezugswert der spez. Schnittkraft und Werkstoffkonstante für den Werkstoff GGG-60 aus [27]

Das Ergebnis der analytischen Zerspankraftberechnung für die Schnittkraft F_c mit der Formel 2.9 wird in der *Tabelle 5.5* angegeben:

Schnittkraft F_c	142,31 N
--------------------	----------

Tabelle 5.5: Analytisch berechnete Schnittkraft F_c

Es ergibt sich für die Schnittkraft F_c ein Wert von 142,31 N, welches den wichtigsten Eingangsparameter für die statisch-mechanische Simulation darstellt. Unter Berücksichtigung dieser Kraft wurden die Simulationen für den Vergleich der verschiedenen Auslegungsformen des Kühlkanals der Wendeschneidplatten durchgeführt.

Ein weiterer wesentlicher Parameter für die Simulation, besonders die noch folgende thermische Untersuchung, ist die Schnittleistung P_c , die über die Formel 2.10 berechnet wurde. Das Ergebnis der analytisch berechneten Schnittleistung P_c , ist in der *Tabelle 5.6* angegeben:

Schnittleistung P_c	426,93 W
-----------------------	----------

Tabelle 5.6: Analytisch berechnete Schnittleistung P_c

Die errechnete Schnittleistung P_c wird bei der Zerspaltung beinahe vollständig in Wärme umgewandelt. Die Umwandlung erfolgt über die plastische Verformung in der Scherzone und am Berührungspunkt zwischen dem abfließenden Span und der Spanfläche des Werkzeuges. Diese Wärme wird zum Teil über den Span, das Werkzeug, das Werkstück und der Umgebung abgeführt [3]. Die umgewandelte Wärme wird laut [28] zu 40-70 % vom Span, zu 2-15 % vom Werkstück und zu 2-10 % vom Werkzeug aufgenommen. Aufgrund der deutlich besseren Wärmeleitfähigkeit des Diamant-Schneidstoffes ist davon auszugehen, dass prozentuell gesehen sogar mehr Wärme über das Werkzeug abgeführt werden kann.

Für die Strömungssimulation ist der Wärmestrom \dot{Q} , der aus dem Zerspaltungsprozess an das Werkzeug abgegeben wird, von wesentlicher Bedeutung (siehe *Abbildung 5.3*).

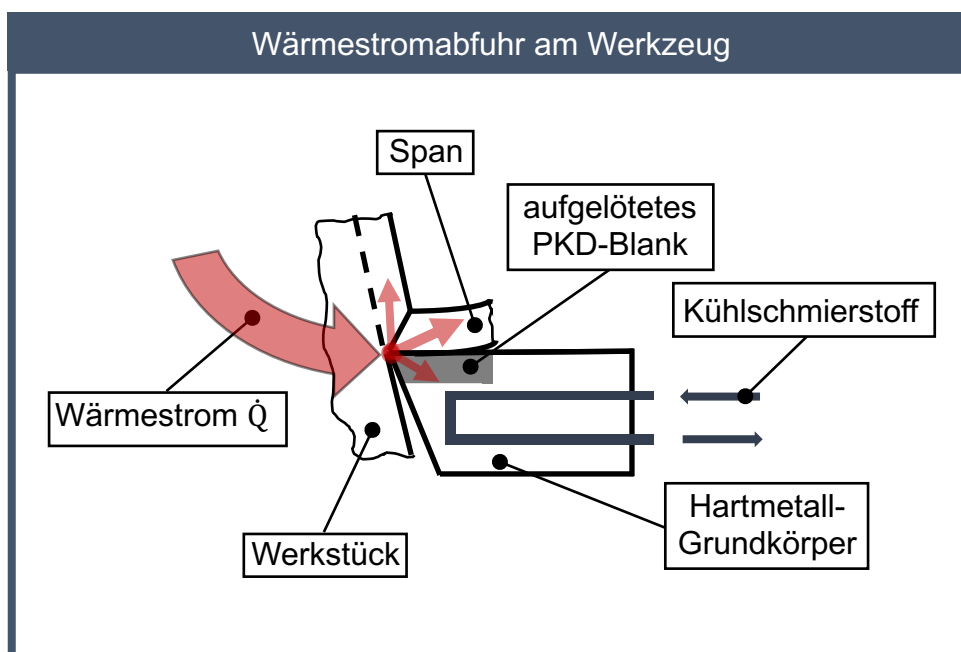


Abbildung 5.3: Abfuhr der umgewandelten Wärme am Werkzeug

5.2.2 Simulationsparameter

Damit die Simulation unter ANSYS realitätsnahe Ergebnisse liefert, wurde die Materialbibliothek mit den vorhandenen Anwendungswerkstoffen erweitert. Die folgenden *Tabellen* 5.7 bis 5.8 enthalten die Werkstoffeigenschaften der eingesetzten Werkstoffe.

Dichte ρ	15100 kg/m ³
Elastizitätsmodul E	650000 N/mm ²
Streckgrenze R_e	2200 N/mm ²
Druckfestigkeit	5700 N/mm ²
Wärmeleitfähigkeit λ	80 W/(m*K)
Wärmeausdehnungskoeffizient α	$5 \cdot 10^{-6}$ 1/K
Querdehnungszahl ν	0,21

Tabelle 5.7: Werkstoff-Simulationsparameter Wolframkarbid (Hartmetall) [3,29]

Dichte ρ	4120 kg/m ³
Elastizitätsmodul E	776000 N/mm ²
Streckgrenze R_e	> 50000 N/mm ²
Druckfestigkeit	7600 N/mm ²
Wärmeleitfähigkeit λ	560 W/(m*K)
Wärmeausdehnungskoeffizient α	$4 \cdot 10^{-6}$ 1/K
Querdehnungszahl ν	0,07

Tabelle 5.8: Werkstoff-Simulationsparameter PKD [11,30]

5.3 Simulationsergebnisse

5.3.1 Mechanische Beanspruchung der Wendeschneidplatte

Es wurden zunächst die Simulationswerkstoffe (siehe *Tabelle* 5.7 bis 5.8) in die ANSYS-Materialbibliothek eingepflegt und anschließend die statisch-mechanische Simulation ausgeführt. Durch die Simulationsergebnisse konnte ein Vergleich zwischen den Versionen getätigt werden, der zur Entscheidungsfindung der finalen Auswahl der Kühlkanalgeometrie führte. Damit besonders am Spanungsquerschnitt genaue Ergebnisse berechnet werden können, wurde das Netz in diesem Bereich verfeinert. Die Elementgrößen am Spanungsquerschnitt sind mit 0,03 mm eingestellt worden. Die folgende *Tabelle* 5.9 gibt den Bereich der Elementgrößen für die statisch-mechanische Simulation an.

statisch-mechanische Simulation (Solid - WSP)

0,03 bis 2,0 mm

Tabelle 5.9: Elementgrößen für die statisch-mechanische Simulation

Es ist in den nachfolgenden Ergebnissen eindeutig ersichtlich, dass die „Wendeschneidplatte - Version 2“, sowohl für die Wendeschneidplatte mit 0,6 mm PKD-Blank als auch für die Wendeschneidplatte mit 1,4 mm PKD-Blank, die besten Ergebnisse hinsichtlich der Vergleichsspannung und für die Gesamtverformung liefert. Die Bezeichnungen PKD 1 bzw. PKD 2 dienen zur Unterscheidung des PKD-Blanks, die in den nachfolgenden Kapiteln (siehe 6.1.1) genauer behandelt werden. Anhand der *Tabelle 5.10* können die Simulationsergebnisse abgelesen werden.

		PKD 1 (0,6 mm)	PKD 2 (1,4 mm)
Version 1	Gesamtverformung (μm)	5,37	3,74
	Vergleichsspannung (N/mm^2)	2905,7	2712,3
Version 2	Gesamtverformung (μm)	5,32	3,54
	Vergleichsspannung (N/mm^2)	2646,2	2590,3
Version 3	Gesamtverformung (μm)	6,14	4,99
	Vergleichsspannung (N/mm^2)	2798,2	2900,0
Version 4	Gesamtverformung (μm)	5,54	4,33
	Vergleichsspannung (N/mm^2)	2851,8	2912,6
Version 5	Gesamtverformung (μm)	7,61	4,53
	Vergleichsspannung (N/mm^2)	2671,0	2737,1
Version 6	Gesamtverformung (μm)	6,07	4,47
	Vergleichsspannung (N/mm^2)	2674,2	2978,5
Version 7	Gesamtverformung (μm)	6,60	4,47
	Vergleichsspannung (N/mm^2)	2980,6	3016,6

Tabelle 5.10: Simulationsergebnisse für die Auswahl der Wendeschneidplattenausführung

Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit wurde die „Wendeschneidplatte – Version 2“ verwendet und konstruktiv verfeinert. Die Rundungen im Kühlkanal wurden fertigungsgerecht optimiert und die Position des Kühlkanals etwas näher in Richtung der Schneidenecke/-kante verschoben. Mit den eingebrachten Verbesserungen wurde die Simulation für beide PKD-Blankdicken erneut durchgeführt. Anhand der statisch-mechanischen Simulationsergebnisse ist ersichtlich, dass die äußere Kraft (Schnittkraft F_c) auf die Wendeschneidplatte keine allzu hohen mechanischen Belastungen verursacht, was für eine Feinbearbeitung nicht anders zu erwarten war.

Für die Umsetzung der gewünschten Kühlkanalgeometrie sollte es somit keine Probleme hinsichtlich mechanischer Stabilität der Wendeschneidplatte geben. Die *Abbildungen 5.4 bis 5.5* und die *Tabelle 5.11* zeigen die zu erwartenden Vergleichsspannungen und Gesamtverformungen an der Wendeschneidplatte mit dem jeweiligen PKD-Blank.

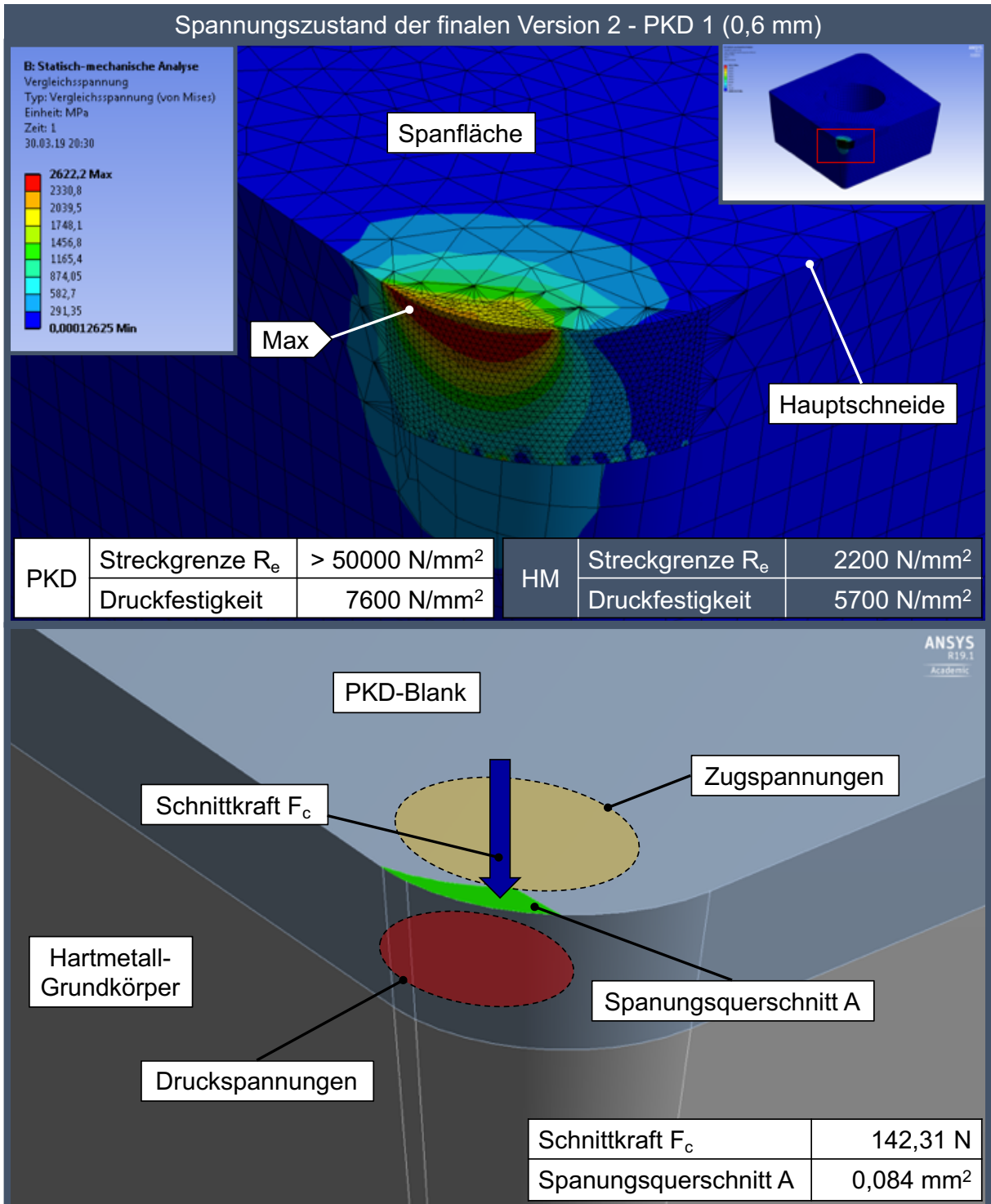


Abbildung 5.4: Ergebnis der Vergleichsspannung an der finalen Version 2 - PKD 1 (0,6 mm)

		PKD 1 (0,6 mm)	PKD 2 (1,4 mm)
finale Version 2	Gesamtverformung (μm)	2,47	3,96
	Vergleichsspannung (N/mm^2)	2622,2	2584,4

Tabelle 5.11: Zu erwartende Ergebnisse der finalen Version 2

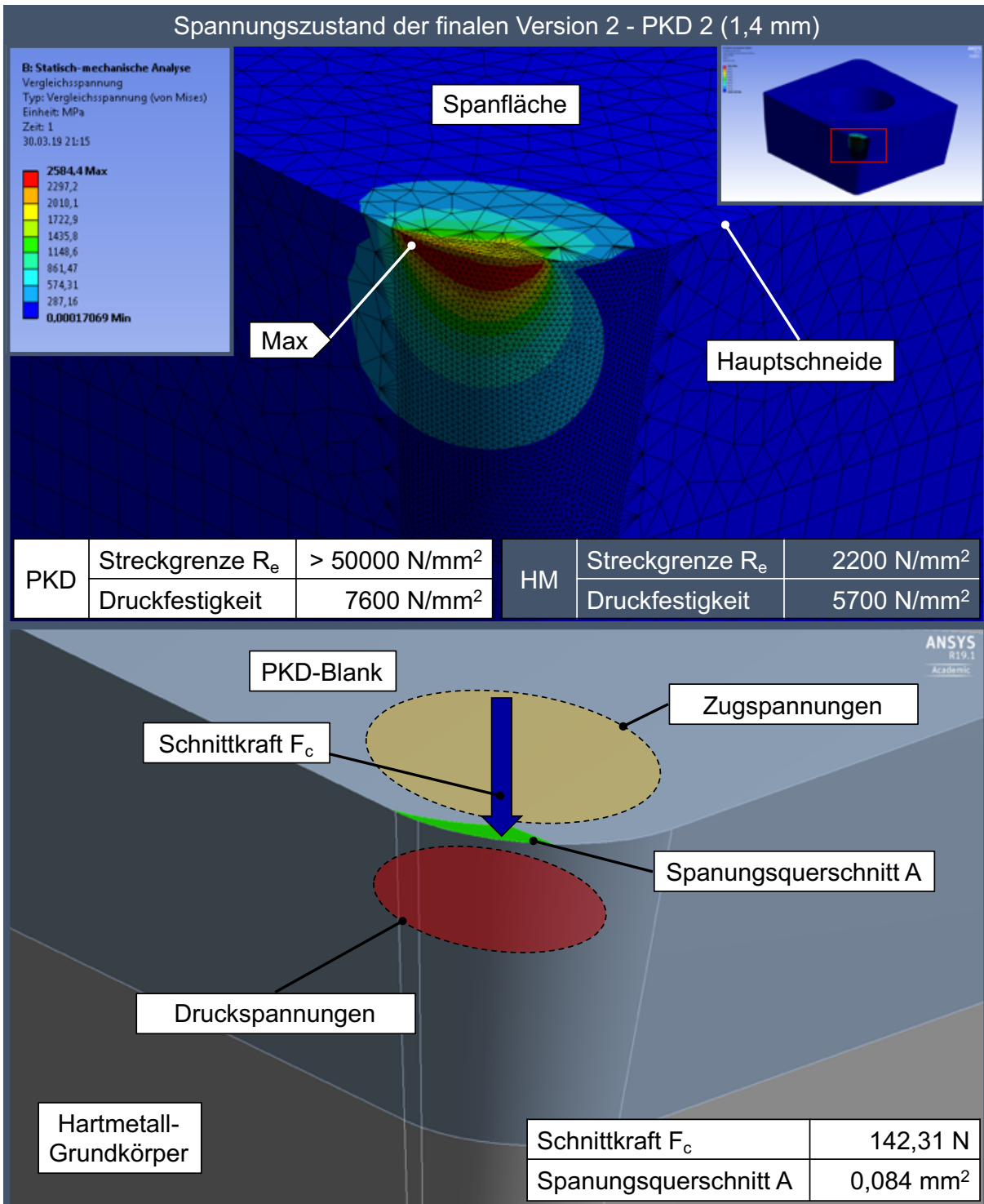


Abbildung 5.5: Ergebnis der Vergleichsspannung an der finalen Version 2 - PKD 2 (1,4 mm)

5.3.2 Thermische Beanspruchung der Wendeschneidplatte mit interner Kühlung

Für die Simulation der Strömungsverhältnisse wurde das k- Ω -SST (Shear-Stress-Transport)-Modell verwendet. Anhand der erstellten Strömungssimulationen sind Erkenntnisse über die thermische Belastung der PKD-Wendeschneidplatte bei unterschiedlichen Kühlmethodeen gewonnen worden. Das FEM-Modell der Strömungssimulation wurde im Bereich des Spanungsquerschnitts und der Innenkühlung der Wendeschneidplatte wiederum feiner vernetzt, da aufgrund der eingebrachten Wärme und der Innenkühlung große Temperaturgradienten zu erwarten sind. Die *Tabelle 5.12* gibt den Bereich der Elementgrößen für die Strömungssimulation an.

Strömungssimulation (Solid - WSP)	1,0 bis 2,0 mm
Strömungssimulation (Fluid - KSS)	0,15 bis 2,0 mm

Tabelle 5.12: Elementgrößen für die Strömungssimulation

Die zuvor berechnete Schnittleistung P_c (siehe Kapitel 5.2.1), die für den zugrundeliegenden Zerspanungsprozess aufgebracht werden muss, wird fast vollständig in Wärme umgewandelt. Sie entspricht somit dem in den Gesamtprozess eingebrachten Wärmestrom \dot{Q} (siehe *Formel 2.12*). Dieser wird für die Durchführung der thermischen FEM-Analyse über den Spanungsquerschnitt auf der Spanfläche des Werkzeuges (ergibt die Wärmestromdichte q) eingebracht.

$$P_c = \dot{Q} = 426,93 \text{ W} \quad (2.12)$$

Um die Wärmeentwicklung an der Kontaktzone besser zu simulieren und die Temperaturentwicklung bei Anwendung der Innenkühlung genauer zu analysieren, musste das dynamische Verhalten während der Zerspanung über die Bearbeitungszeit berücksichtigt werden. Anhand der Daten in der nachfolgenden *Tabelle 5.13* wurde eine Bearbeitungszeit von 11,2 Sek. für einen Standweg l_f von 50 mm errechnet und in weiterer Folge für die Strömungssimulation berücksichtigt.

Wärmestrom \dot{Q}	426,93 W
Drehzahl n	954,9 U/min
Rohteildurchmesser	60 mm
Vorschub f	0,28 mm/U
Standweg l_f	50 mm

Tabelle 5.13: Daten für die Ermittlung der Simulationsdauer

Die nachfolgende *Tabelle 5.14* stellt den Temperaturverlauf für den Spanungsquerschnitt auf der Spanfläche der Wendeschneidplatte mit interner Kühlung dar. Dabei ist deutlich ersichtlich, dass sich bereits nach kurzer Bearbeitungszeit von etwa 5 Sek. ein quasi-stationärer Temperaturzustand einstellt. Das bedeutet wiederum, dass der gewählte Standweg l_f und die daraus resultierende Bearbeitungszeit in ausreichender Größenordnung gewählt wurden.

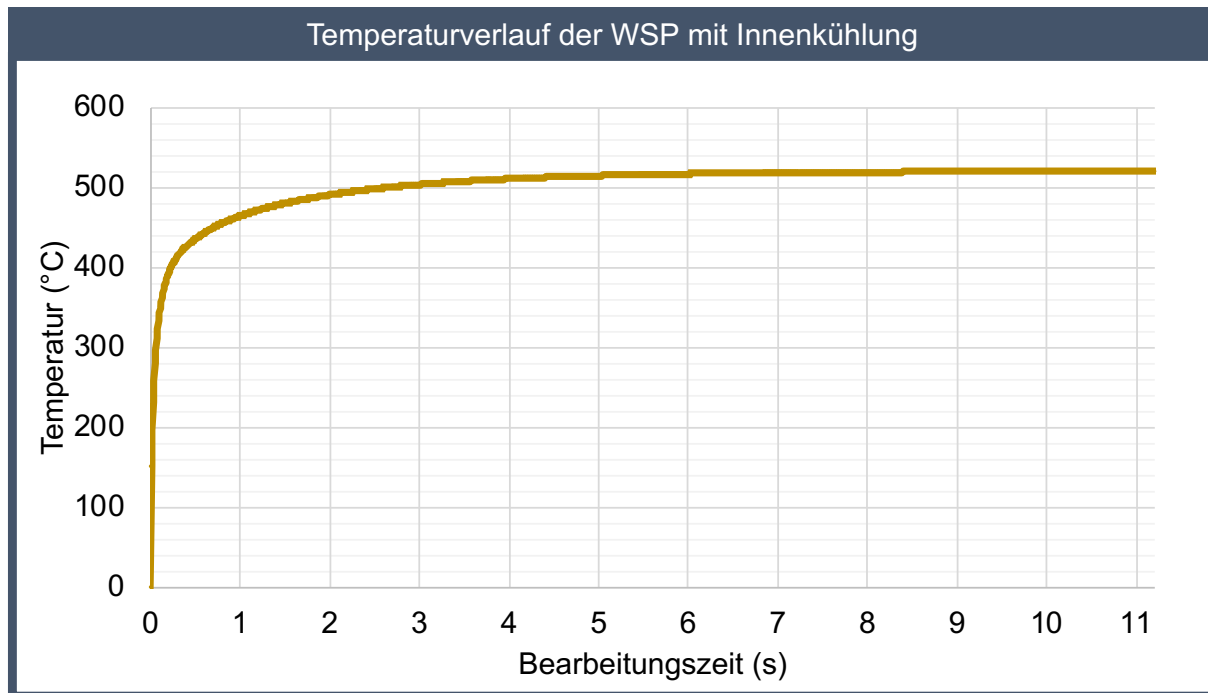


Tabelle 5.14: Zeitliche Temperaturentwicklung der WSP mit interner Kühlung

Durch Anwendung des beschriebenen FEM-Modells und der zugrundeliegenden Simulationsparameter als auch den bereits in Kapitel 5.2.1 definierten bzw. errechneten Größen stellen sich schließlich folgende Temperaturen für die drei verschiedenen Kühlungsmethoden ein (siehe *Abbildungen 5.6 bis 5.8*). In der ersten Strömungssimulation wird keine Kühlung verwendet. Die maximale Temperatur an der Wendeschneidplatte liegt bei etwa 661°C und liegt somit knapp unter der kritischen Temperatur von 700°C, allerdings schon nah an dem kritischen Temperaturschwellwert. Die *Abbildung 5.6* stellt die Temperaturergebnisse der Strömungssimulation ohne Kühlung in Kelvin dar.

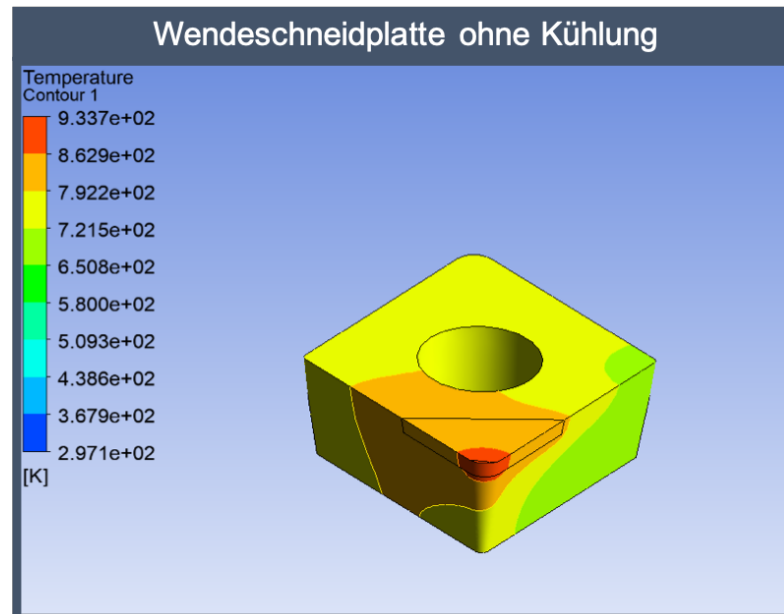


Abbildung 5.6: Strömungssimulation ohne Kühlung

Die zweite Strömungssimulation wurde mit einer Überflutungskühlung simuliert und ergab eine maximale Temperatur von etwa 514°C. Die nachfolgende *Abbildung 5.7* zeigt die Temperaturergebnisse für die Strömungssimulation mit Überflutungskühlung in Kelvin.

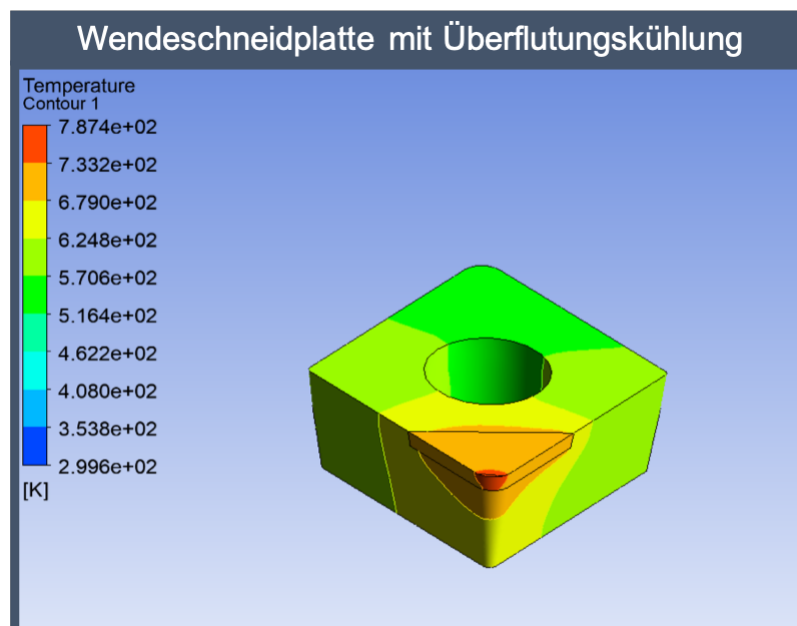


Abbildung 5.7: Strömungssimulation mit Überflutungskühlung

Die dritte Strömungssimulation wurde mit dem entwickelten Kühlkanal für die Innenkühlung der Wendeschneidplatte simuliert. Die Temperaturergebnisse der Innenkühlung sind in der nachfolgenden *Abbildung 5.8* in Kelvin dargestellt.

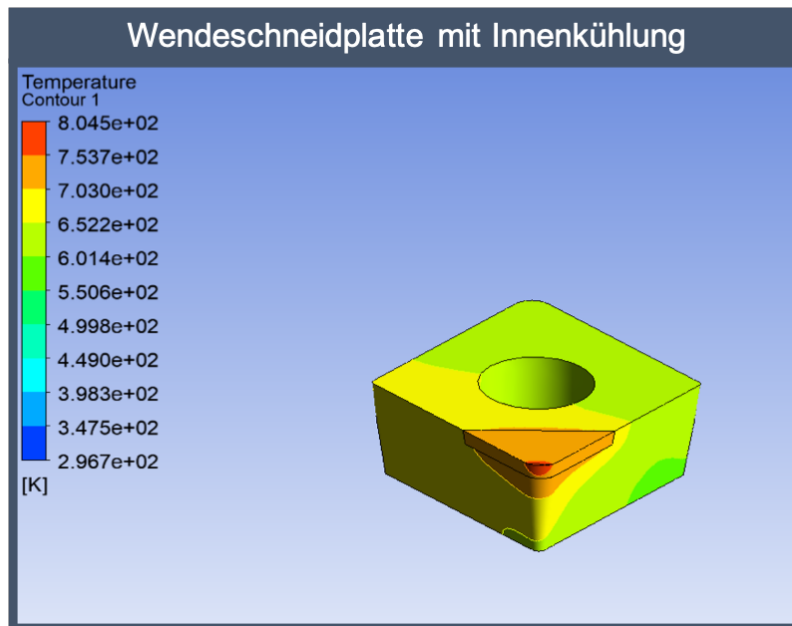


Abbildung 5.8: Strömungssimulation mit Innenkühlung

Anhand der Simulationsergebnisse für die Innenkühlung konnte festgestellt werden, dass die PKD-Wendescheidplatte eine maximale Temperatur von etwa 531°C erreicht und somit auch unter der kritischen Temperatur von 700°C liegt.

Diese Ergebnisse sind für den weiteren Fortlauf der Arbeit sehr wesentlich, denn zum einen kann eine Aussage über die ausreichende Wärmeabfuhr über den konstruierten Kühlkanal getroffen werden und zum anderen können die eingesetzten Simulationsparameter auch als Prozessparameter bei der experimentellen Untersuchung angewendet werden. Es sei auch erwähnt, dass die Strömungssimulation mit der Innenkühlung die Minimalmengenschmierung (siehe Kapitel 2.4.3) nicht berücksichtigt. Die externe Zuführung der Minimalmengenschmierung (MMS) sollte bei kombinierter Anwendung mit der Innenkühlung zu einem noch günstigeren Wärmeverhalten führen, da aufgrund des Schmiereffektes weniger Reibung zwischen Werkstück und Werkzeug erwartet werden kann.

6 Experimentelle Untersuchung

6.1 Verwendete Werkzeuge und Betriebsmittel

6.1.1 Sorten der CBN/PKD-Wendeschnidplatte

Bei der experimentellen Untersuchung wurden grundsätzlich zwei unterschiedliche Schneidwerkstoffe von der Fa. *Becker Diamantwerkzeuge* eingesetzt. Es wurde zum einen CBN und zum anderen PKD als Schneidwerkstoff eingesetzt. Die Herstellung und die mechanischen Stoffeigenschaften der beiden Schneidwerkstoffe wurden bereits in den Grundlagen beschrieben (siehe Kapitel 2.2.3 und 2.2.4). Da sich die Wendeschnidplatten hinsichtlich ihrer Sorte und Ausführung unterscheiden, werden sie anhand von Tabellen kurz zusammengefasst. Die Wendeschnidplatten sind größtenteils ohne Beschichtung ausgeführt; der Typ CCGW09T308-D-15S-2MC ist jedoch mit Beschichtung ausgeführt, für welche allerdings keine Details vom Hersteller zur Verfügung standen. Die unterschiedlichen Sorten und Ausführungen der CBN- und PKD-Wendeschnidplatten können aus den folgenden *Tabellen 6.1 bis 6.7* und *Abbildungen 6.1 bis 6.7* abgelesen werden:

Bezeichnung	CCGW09T308-A-15EW
Dicke CBN-Blank	0,8 mm
CBN-Gehalt	90 %
Korngröße	0,75 μm
Beschichtung	ohne
Schneidkantenausführung	Standard
Eckenradius r_ϵ	0,8 mm
Bearbeitung	Kugelgraphitguss, Sinterstahl

Tabelle 6.1: CBN-Wendeschnidplatte CCGW09T308-A-15EW

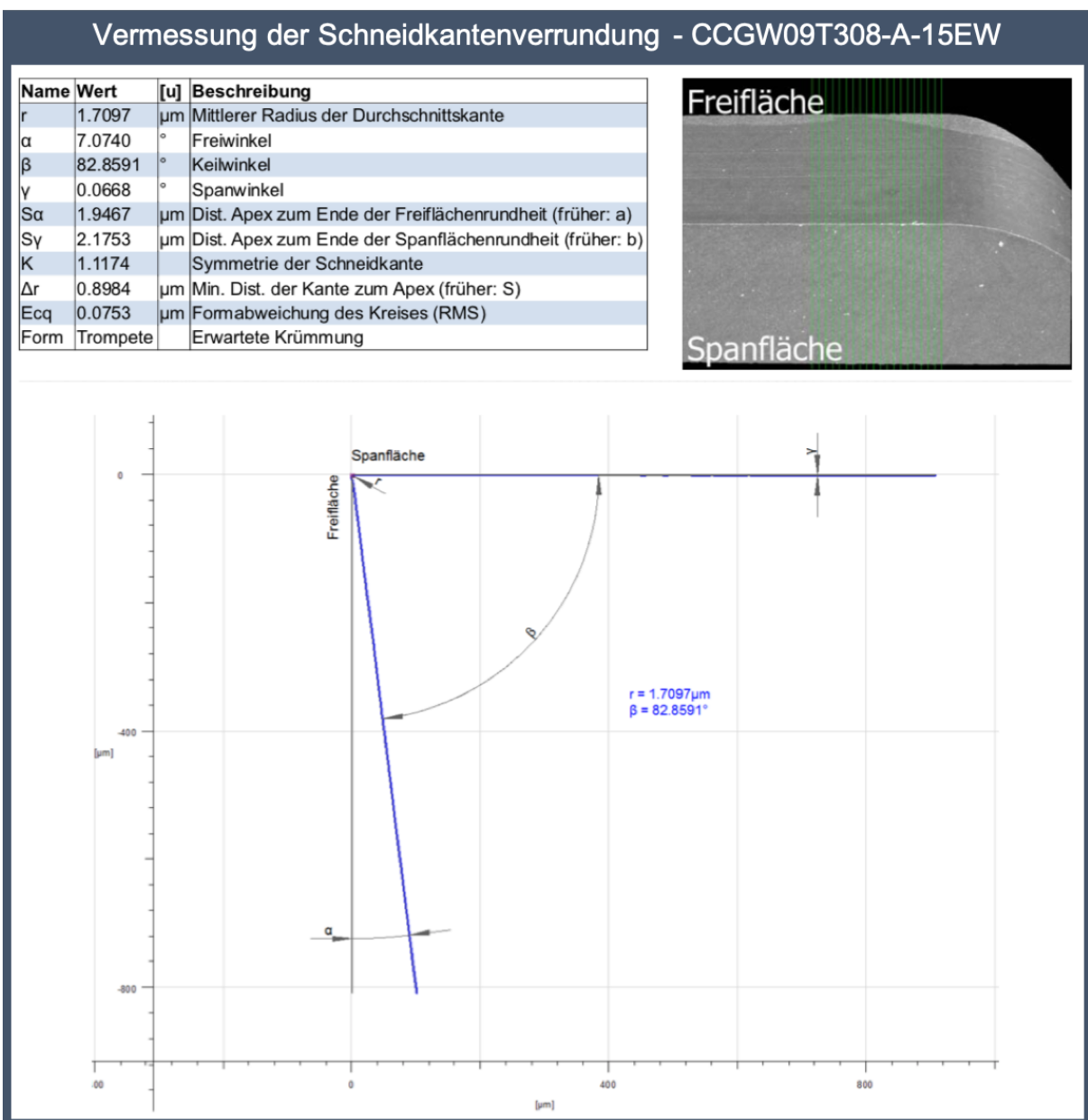


Abbildung 6.1: CBN-Wendeschnidplatte CCGW09T308-A-15EW

Bezeichnung	CCGW09T308-A-15S-2MC
Dicke CBN-Blank	0,8 mm
CBN-Gehalt	90 %
Korngröße	0,75 μm
Beschichtung	mit
Schneidkantenausführung	Standard
Eckenradius r_ϵ	0,8 mm
Bearbeitung	Kugelgraphitguss, Sinterstahl

Tabelle 6.2: CBN-Wendeschnidplatte CCGW09T308-A-15S-2MC

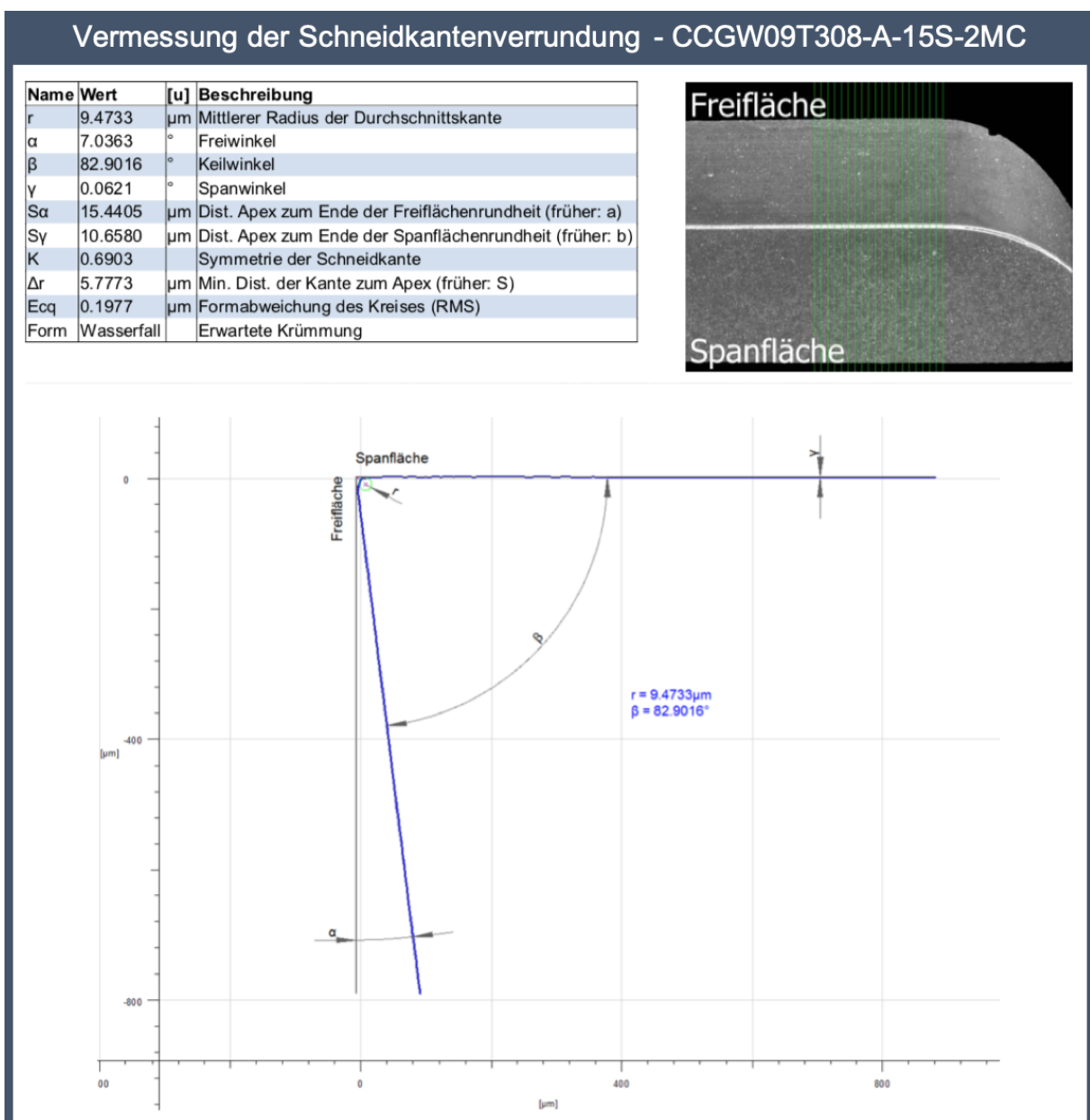


Abbildung 6.2: CBN-Wendeschnidplatte CCGW09T308-A-15S-2MC

Bezeichnung	CCGW09T308-D-15S-2MC
Dicke CBN-Blank	0,8 mm
CBN-Gehalt	90 %
Korngröße	0,75 μm
Beschichtung	mit
Schneidkantenausführung	Negativ-Fase
Eckenradius r_ϵ	0,8 mm
Bearbeitung	Kugelgraphitguss, Sinterstahl

Tabelle 6.3: CBN-Wendescheidplatte CCGW09T308-D-15S-2MC

Vermessung der Schneidkantenverrundung - CCGW09T308-D-15S-2MC

Name	Wert	[u]	Beschreibung
r	5.9405	μm	Mittlerer Radius der Durchschnittskante
bp1y	150.7178	μm	Proj. Negativfasenlänge 1 (früher: Np1)
bp2y	149.8467	μm	Proj. Negativfasenlänge 2 (früher: Np2)
bp3y	54.9487	μm	Proj. Länge der Negativfase 3
by	160.5317	μm	Wahre Negativfasenlänge (früher: Nt)
γ_b	20.1380	$^\circ$	Winkel der Negativfase (früher: α negativ)
α	7.1208	$^\circ$	Freiwinkel
β	82.7851	$^\circ$	Keilwinkel
γ	0.0941	$^\circ$	Spanwinkel
Sa	7.6219	μm	Dist. Apex zum Ende der Freiflächenrundheit (früher: a)
Sy	4.0809	μm	Dist. Apex zum Ende der Spanflächenrundheit (früher: b)
K	0.5354		Symmetrie der Schneidkante
Δr	1.8522	μm	Min. Dist. der Kante zum Apex (früher: S)
Ecq	0.0846	μm	Formabweichung des Kreises (RMS)
Form	Wasserfall		Erwartete Krümmung

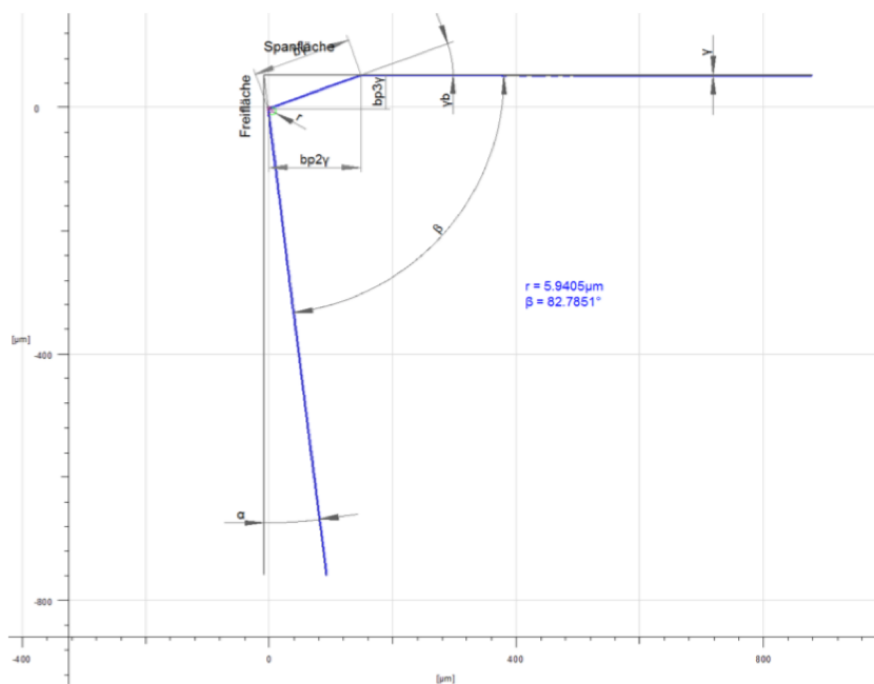
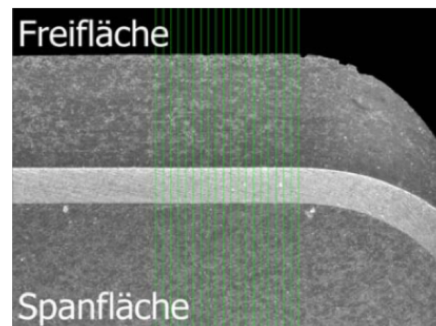
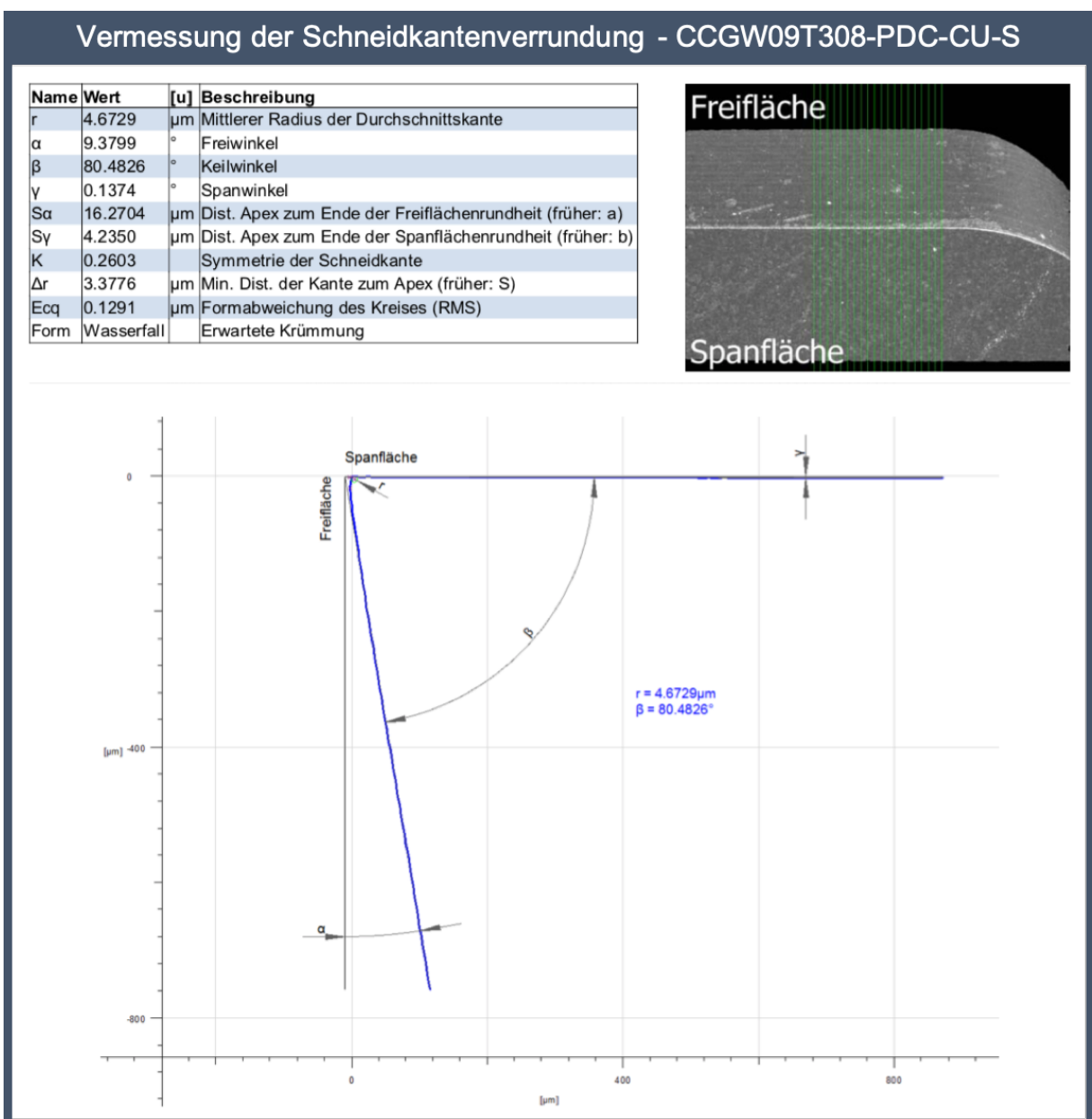


Abbildung 6.3: CBN-Wendescheidplatte CCGW09T308-D-15S-2MC

Bezeichnung	CCGW09T308-PDC-CU-S
Dicke PKD-Blank	1,4 mm
Korngröße	20-35 μm
Schneidkantenerzeugung	Laserbearbeitung
Eckenradius r_ϵ	0,8 mm
Anwendung	schruppen bis schlichten
Bearbeitung	unter-/übereutektischem Aluminium hochabrasive NE-Metalle faserverstärkte Kunststoffe

Tabelle 6.4: PKD-Wendeschneidplatte CCGW09T308-PDC-CU-S



Bezeichnung	CCGW09T304-PDC-CU-S
Dicke PKD-Blank	1,4 mm
Korngröße	20-35 μm
Schneidkantenerzeugung	Laserbearbeitung
Eckenradius r_ϵ	0,4 mm
Anwendung	schruppen bis schlichten
Bearbeitung	unter-/übereutektischem Aluminium hochabrasive NE-Metalle faserverstärkte Kunststoffe

Tabelle 6.5: PKD-Wendeschneidplatte CCGW09T304-PDC-CU-S

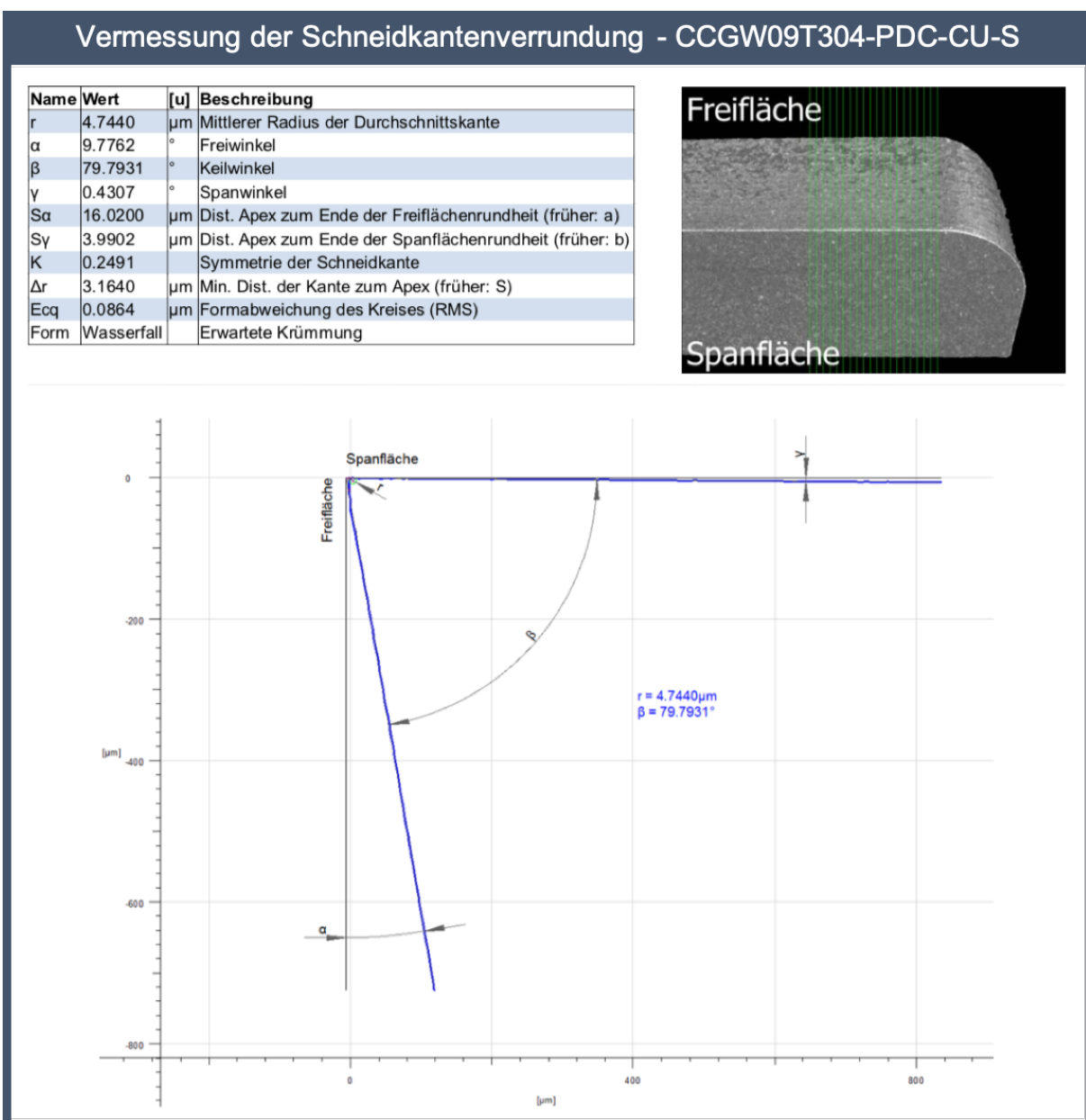


Abbildung 6.5: PKD-Wendeschneidplatte CCGW09T304-PDC-CU-S

Bezeichnung	CCGW09T308-PDC
Dicke PKD-Blank	0,6 mm
Korngröße	2-4 μm
Schneidkantenerzeugung	Schleifbearbeitung
Eckenradius r_ϵ	0,8 mm
Anwendung	schruppen bis vorschlichten
Bearbeitung	untereutektischem Aluminium NE-Metalle Kunststoffe

Tabelle 6.6: PKD-Wendescheidplatte CCGW09T308-PDC

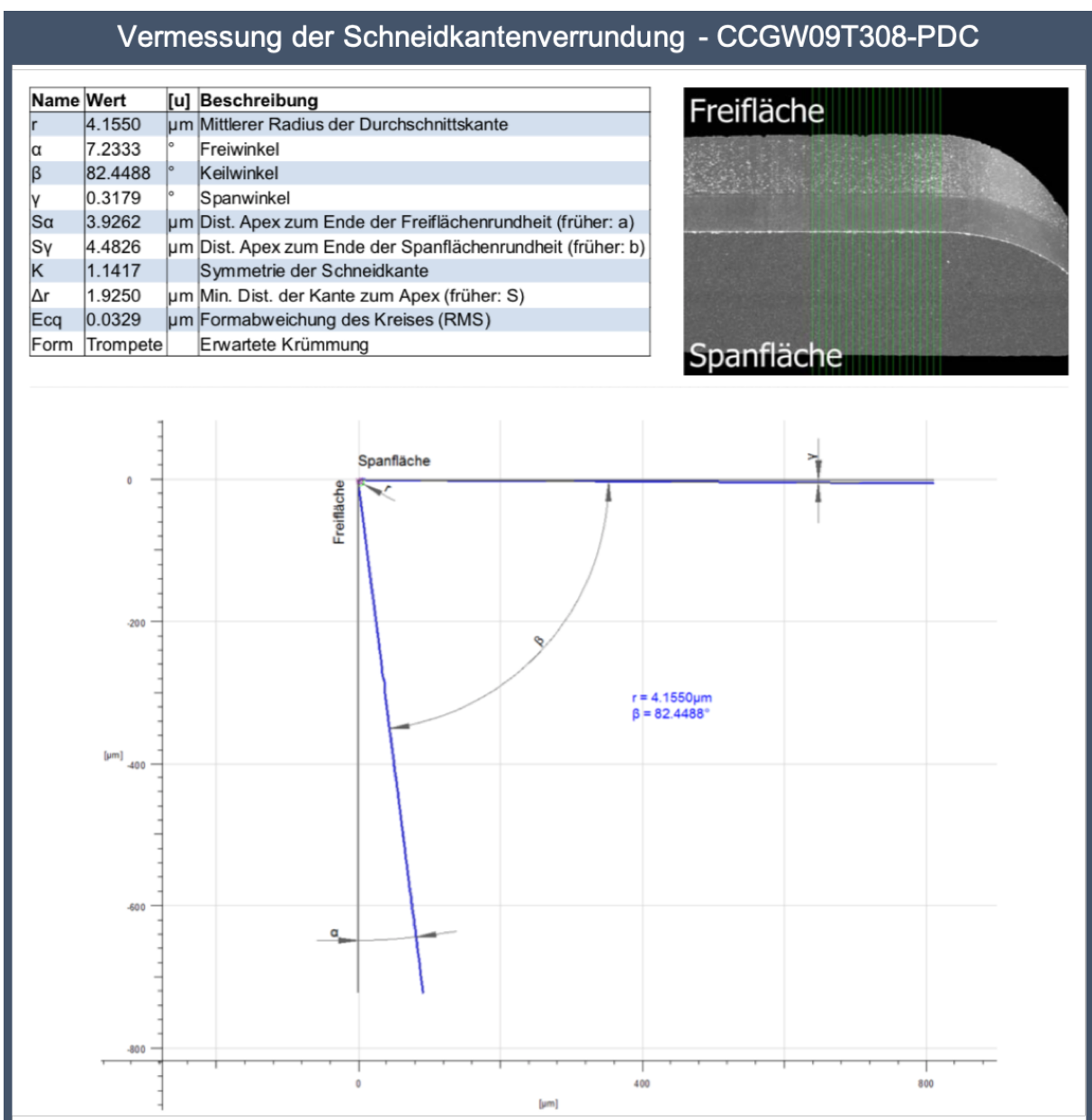


Abbildung 6.6: PKD-Wendescheidplatte CCGW09T308-PDC

Bezeichnung	CCGT09T308-PDC-S-CB2
Dicke PKD-Blank	0,6 mm
Korngröße	8-10 μm
Schneidkantenerzeugung	Schleifbearbeitung
Eckenradius r_ϵ	0,8 mm
Anwendung	schruppen bis vorschlichten
Bearbeitung	untereutektischem Aluminium NE-Metalle Kunststoffe

Tabelle 6.7: PKD-Wendescheidplatte CCGT09T308-PDC-S-CB2

Vermessung der Schneidkantenverrundung - CCGT09T308-PDC-S-CB2

Name	Wert	[u]	Beschreibung
r	6.3688	μm	Mittlerer Radius der Durchschnittskante
bp1y	154.0844	μm	Proj. Negativfasenlänge 1 (früher: Np1)
bp2y	154.2780	μm	Proj. Negativfasenlänge 2 (früher: Np2)
bp3y	26.1351	μm	Proj. Länge der Negativfase 3
by	156.2797	μm	Wahre Negativfasenlänge (früher: Nt)
yb	9.6148	$^\circ$	Winkel der Negativfase (früher: α negativ)
α	7.2195	$^\circ$	Freiwinkel
β	60.8305	$^\circ$	Keilwinkel
γ	21.9500	$^\circ$	Spanwinkel
S α	4.5789	μm	Dist. Apex zum Ende der Freiflächenrundheit (früher: a)
S γ	17.9565	μm	Dist. Apex zum Ende der Spanflächenrundheit (früher: b)
K	3.9216		Symmetrie der Schneidkante
Δr	2.9905	μm	Min. Dist. der Kante zum Apex (früher: S)
Ecq	0.0960	μm	Formabweichung des Kreises (RMS)
Form	Trompete		Erwartete Krümmung

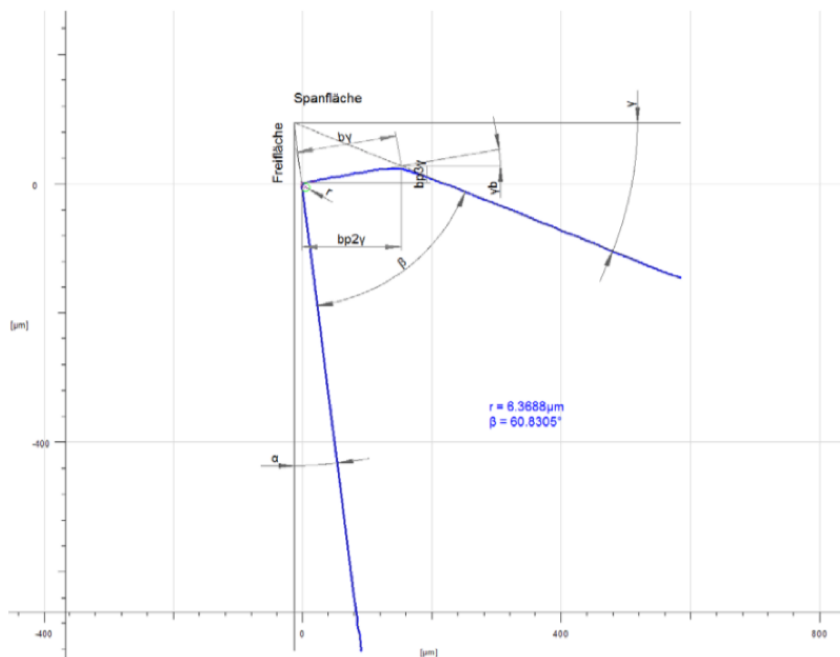
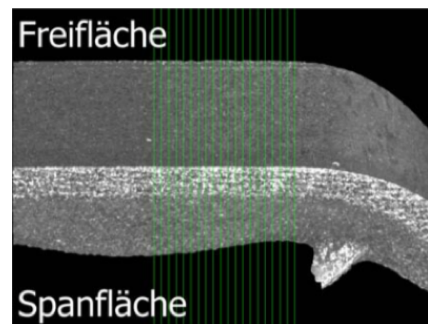


Abbildung 6.7: PKD-Wendescheidplatte CCGT09T308-PDC-S-CB2

6.1.2 Eigenschaften der MMS-Sorten

Das Funktionsprinzip und die Vorteile der Minimalmengenschmierung (MMS) wurden bereits in den Grundlagen (siehe Kapitel 2.4.3) im Detail beschrieben. Bei der experimentellen Untersuchung kommen zwei verschiedene MMS-Stoffe der Fa. *Blaser Swissslube* zum Einsatz. Es wird zum einen die Sorte *Vascomill MMS FA 2* und zum anderen die Sorte *Vascomill MMS HD SE 1* verwendet. Die folgenden *Tabellen 6.8 bis 6.9* sollen die Unterschiede der beiden Sorten aufzeigen:

Bezeichnung	Vascomill MMS FA 2
Eigenschaften	gute Schmiereigenschaft extrem Verklebungs- und Verharzungsarm
Viskosität (40°C)	32 mm ² /s
Dichte (20°C)	0,85 g/cm ³
Flammpunkt	202 °C

Tabelle 6.8: Eigenschaften der MMS-Sorte Vascomill MMS FA 2

Bezeichnung	Vascomill MMS HD SE 1
Eigenschaften	starke Additivierung sehr schmieraktiv gute Sprühbarkeit
Viskosität (40°C)	40 mm ² /s
Dichte (20°C)	1,00 g/cm ³
Flammpunkt	200 °C

Tabelle 6.9: Eigenschaften der MMS-Sorte Vascomill HD SE 1

6.1.3 Eigenschaften des verwendeten Kühlschmierstoffes

Der Anwendungsbereich sowie die Aufgaben des Kühlschmierstoffes (KSS) wurden ebenso bereits unter dem Kapitel 2.4.1 ausführlich beschrieben. Bei der Umsetzung der experimentellen Untersuchung kam der Kühlschmierstoff *Vasco 6000* ebenfalls von der Fa. *Blaser Swissslube* zur Anwendung. Der Kühlschmierstoff (KSS) wurde während der experimentellen Untersuchung nicht nur bei der äußeren Kühlung der Wendeschneidplatte eingesetzt, sondern auch für die Innenkühlung der Wendeschneidplatten verwendet. Die Eigenschaften und der Betriebszustand können in der nachfolgenden *Tabelle 6.10* abgelesen werden:

Bezeichnung	Vasco 6000
Eigenschaften	gutes Abfließverhalten für Hochdruckanwendungen hohe Stabilität in Hartwasser
Viskosität (40°C)	42 mm ² /s
Dichte (20°C)	0,99 g/cm ³
Flammpunkt	129 °C
pH-Wert	9
Refraktometer	11

Tabelle 6.10: Eigenschaften und Betriebszustand des KSS Vasco 6000

6.2 Vorbereitung der Wendeschneidplatten

Um den offenen Kühlkreislauf für die Innenkühlung zu realisieren, mussten die Wendeschneidplatten aus CBN bzw. PKD unter Verwendung der Senkerodiermaschine *Agietron 2U* (siehe Anhang) mit einem Kühlkanal versehen werden. Die Wendeschneidplatten bestehen allesamt aus einem Hartmetall-Grundkörper und einem darauf aufgelöteten, sortenspezifischen Blank, die je nach Ausführung zudem in ihrer Blankdicke variieren kann. Besonders auffällig war der langsame Materialabtrag im PKD-Blank (siehe Kapitel 4.3, der Kühlkanal wurde bis 0,2 mm Tiefe in das jeweilige Blank erodiert), sowohl die benötigte Zeit als auch der rasante Verschleiß an der Kupferelektrode haben den Erodiervorgang erschwert. Die folgende *Tabelle 6.11* enthält Parameter, die für das Senkerodieren eingestellt wurden:

Leerlaufspannung U	6 V
Entladestrom I	15 A
Impulsdauer T	6 s
Werkstoff	Wolframkupfer-Hartmetall
Erosionsbedienung	mit seitlicher Spülung

Tabelle 6.11: Bearbeitungsparameter für das Senkerodieren des Kühlkanals

Der fertig erodierte Kühlkanal für den offenen Kühlkreislauf wird in der nachfolgenden *Abbildung 6.8* dargestellt.

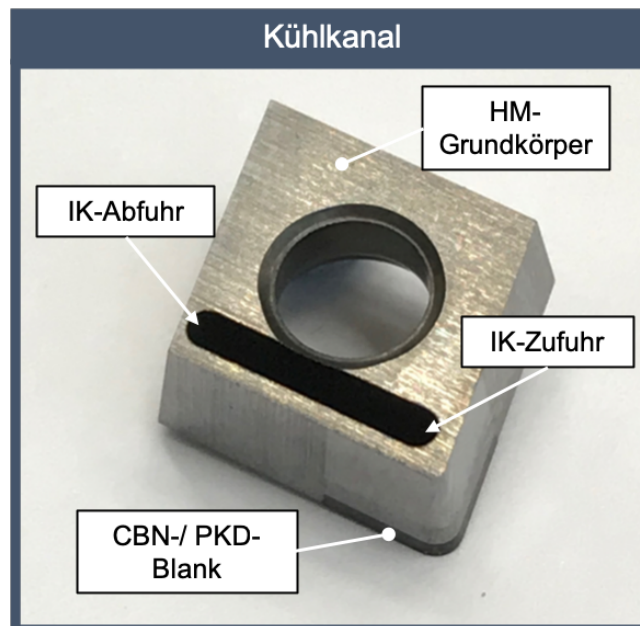


Abbildung 6.8: Senkerodierter Kühlkanal für die Innenkühlung der WSP

Für die Erodierbearbeitung musste im Rahmen dieser Arbeit die Erodieraufnahme und der Erodierstempel konstruiert werden. In der nachfolgenden *Abbildung 6.9* wird die Herstellung des Kühlkanals für die spätere Innenkühlung der Wendeschneidplatte mit Kühlschmierstoff in der Senkerodiermaschine abgebildet.

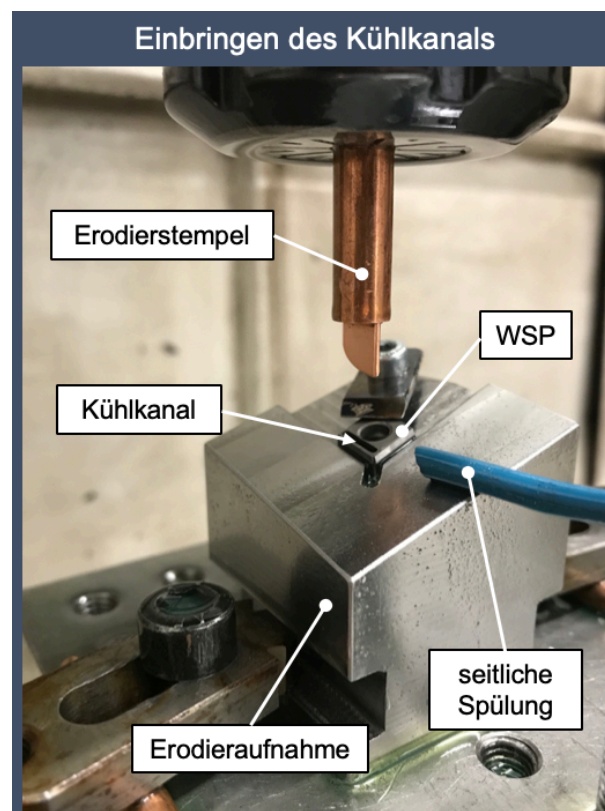


Abbildung 6.9: Erzeugung des Kühlkanals durch das Senkerodieren

6.3 Versuchsaufbau

Die experimentelle Untersuchung der entwickelten Kühlmethode für die CBN- und PKD-Wendeschnidplatten wurde unter Verwendung diverser Betriebsmittel durchgeführt. Der Versuchsaufbau besteht im Wesentlichen aus folgenden Bestandteilen:

- Werkstücke aus GGG-60 (EN-GJS-600-3, Sphäroguss), mit einem Rohteildurchmesser von 60 mm.
- Drehhalter *PCLCR/L 2020K-09S-JHP* der Fa. *ISCAR*, welcher für die zusätzliche Innenkühlung überarbeitet wurde (siehe Kapitel 4.2).
- MMS-Gerät *HPM Breeze Z30* als Einkanalsystem der Fa. *HPM Technologie* (siehe Anhang), welches für die Minimalmengenschmierung verwendet wurde.
- Zwei unterschiedliche MMS-Sorten (*MMS FA 2* & *MMS HD SE 1*) vom Typ *Vascomill* der Fa. *Blaser Swisslube*, die im Kapitel 6.1.2 im Detail beschrieben werden.
- Drehmaschine *CTX GAMMA 1250 TC* der Fa. *DMG MORI* (siehe Anhang).
- Diverse Sorten von Wendeschneidplatten aus CBN und PKD der Fa. *Becker Diamantwerkzeuge* (Tochterunternehmen der *CERATIZIT*-Gruppe), auf die bereits im Kapitel 6.1.1 näher eingegangen wurde.

Der Versuchsaufbau ist in seinen Grundbestandteilen (Werkstück, Drehhalter und Drehmaschine) für jede Versuchsvariante derselbe, jedoch kommt es zu leichten Variationen der Komponenten durch die unterschiedlichen Kühlmethoden. Die drei Kühlmethoden lassen sich folgendermaßen unterscheiden:

- Überflutungskühlung (Referenz): KSS wird von außen über die bereits am Drehhalter vorhandene Sprühdüse (siehe *Abbildung 4.2*) auf die Bearbeitungszone geströmt.
- Interne Kühlung: KSS wird über den offenen Kühlkreislauf durch das Innere der Wendeschneidplatte geführt (IK).
- Kombination aus interner Kühlung und externer Minimalmengenschmierung: Bei der entwickelten Form der Kühlung wird KSS über den offenen Kühlkreislauf durch das Innere der Wendeschneidplatte geführt und zusätzlich extern über die Sprühdüse des Drehhalters MMS auf die Spanfläche der Wendeschneidplatte gesprüht (IK+MMS).

Eine genaue Darstellung der Zufuhranschlüsse bzw. dem Abfuhranschluss am Drehhalter ist in der folgenden *Abbildung 6.10* ersichtlich.

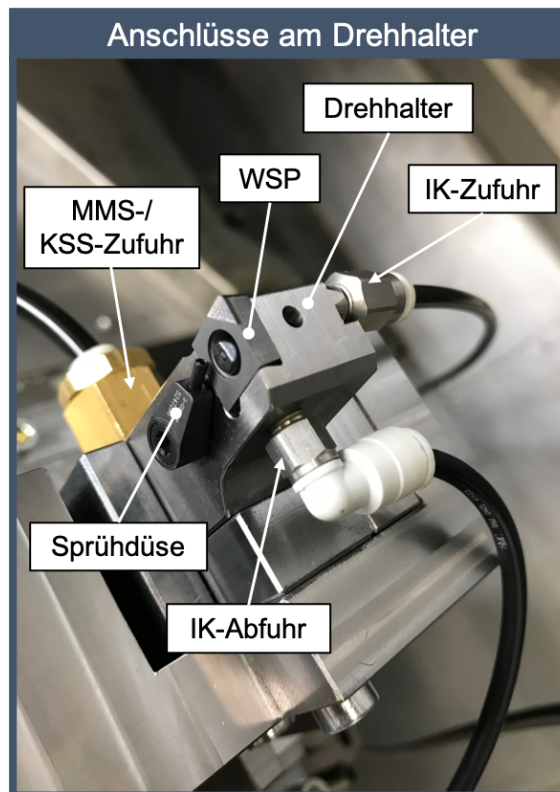


Abbildung 6.10: Darstellung aller möglichen Anschlüsse am Drehhalter

Die *Abbildungen 6.11 bis 6.13* zeigen den Versuchsaufbau für die jeweilige Kühlungsmethode:

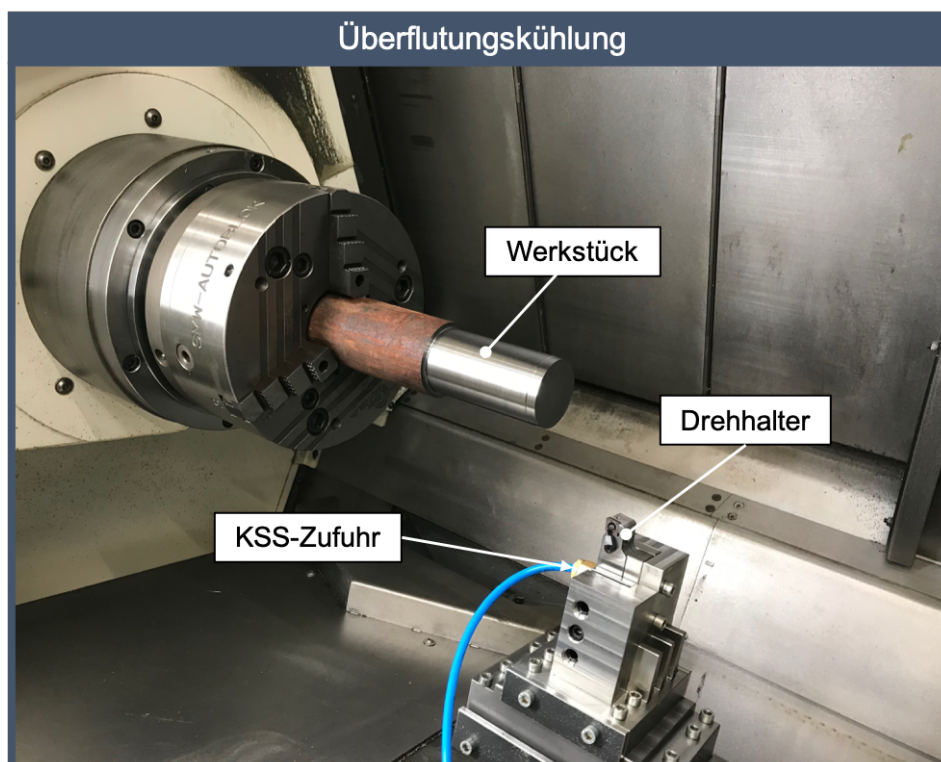


Abbildung 6.11: Versuchsaufbau mit Überflutungskühlung

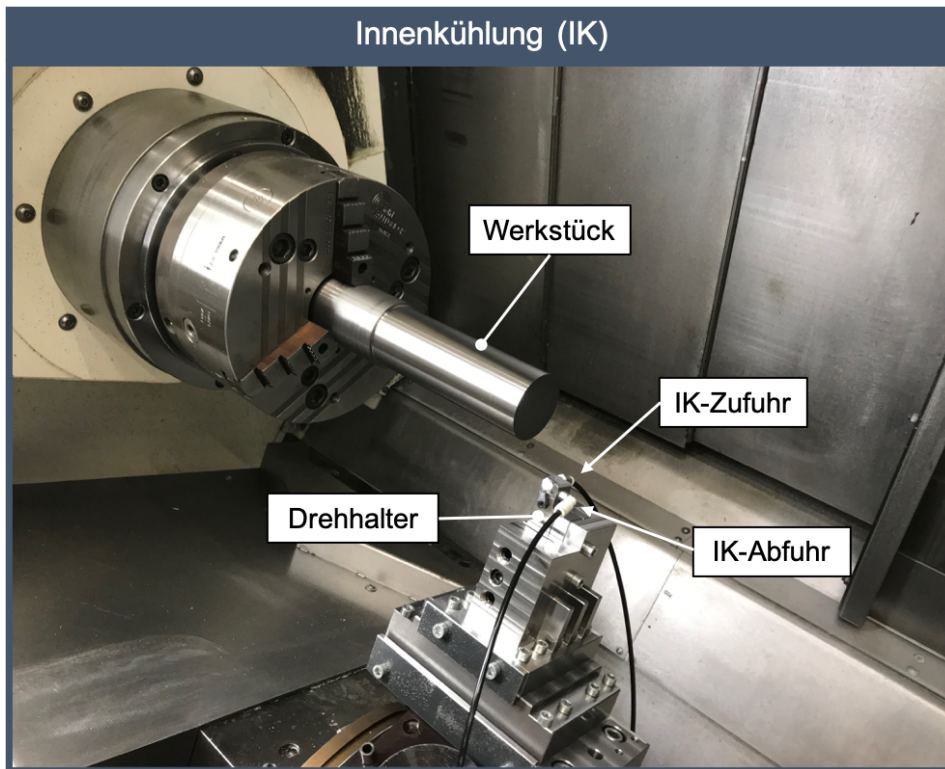


Abbildung 6.12: Versuchsaufbau nur mit Innenkühlung (IK)

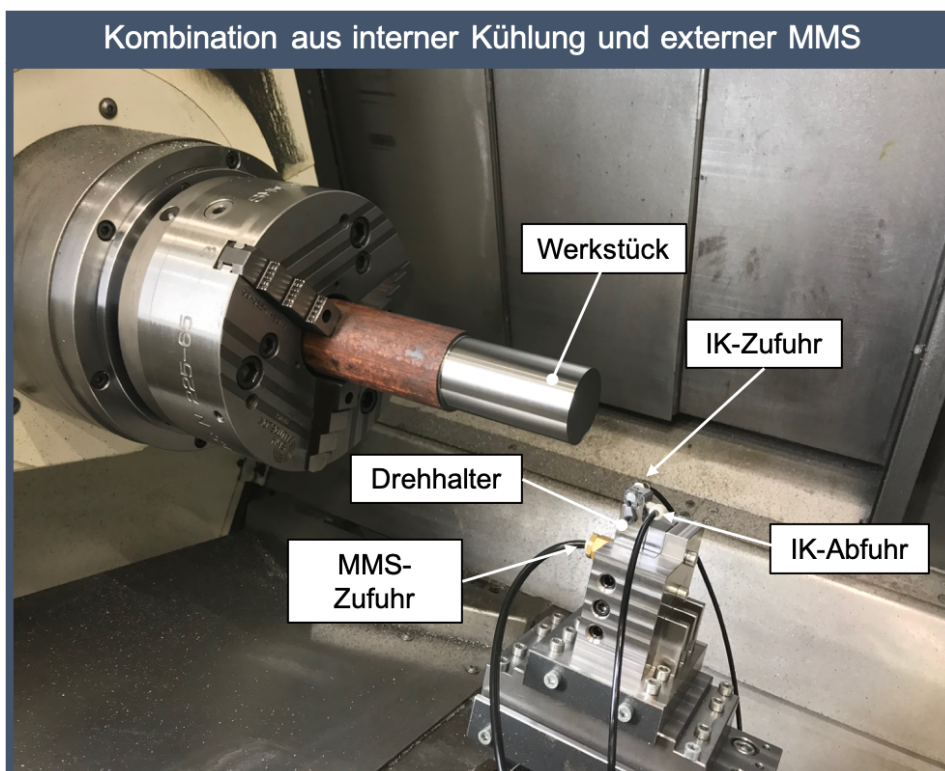


Abbildung 6.13: Versuchsaufbau mit der Kombination aus interner Kühlung

6.4 Versuchsdurchführung

Bei der Versuchsdurchführung musste zwischen den Schneidwerkstoffen CBN und PKD differenziert werden. Da sich die experimentellen Versuche der CBN- und PKD-Wendeschnidplatten hinsichtlich der Schnittgeschwindigkeit v_c unterscheiden, wurden zunächst die Versuche mit den CBN-Wendeschnidplatten durchgeführt. Nachdem alle CBN-Versuche abgeschlossen waren, wurde die Schnittgeschwindigkeit v_c für die Untersuchungen der PKD-Wendeschnidplatten reduziert. Hinsichtlich der Schnittgeschwindigkeit v_c gibt es vom Hersteller für die Zerspanung von GGG-60 mit PKD keine Angaben. Deshalb wurden als Richtwerte für die Schnittgeschwindigkeit v_c Empfehlungen für die Zerspanung von Sphäroguss mittels Hartmetallwerkzeugen und bereits erprobte Parameter [13, 14] aus bisherigen Forschungsarbeiten herangezogen.

Um die Ergebnisse aus den experimentellen Versuchen der CBN- und PKD-Wendeschnidplatten gegenüberzustellen, wurde zunächst die maximale Verschleißmarkenbreite (VB_{max}) für die Benchmark-Versuche beider Schneidwerkstoffe mit 0,2 mm festgelegt. Die Benchmark-Versuche wurden sowohl für CBN als auch für PKD mit einer Überflutungskühlung, die auf eine Durchflussmenge von 3600 ml/min eingestellt wurde, durchgeführt. Durch die zuvor definierte maximale Verschleißmarkenbreite konnte über diesen ersten Benchmark-Versuch der Standweg in Vorschubrichtung (l_f) für alle nachfolgenden Versuche definiert werden.

Die eingestellten Prozessparameter aller CBN-Wendeschnidplatten sind aus dem Katalog des Herstellers entnommen worden und lauten wie folgt:

Vorschub f	0,28 mm/U
Schnitttiefe a_p	0,3 mm
Schnittgeschwindigkeit v_c	600 m/min

Tabelle 6.12: Prozessparameter der CBN-Wendeschnidplatten

Der Benchmark-Versuch für die Ermittlung des Standwegs l_f für den Schneidwerkstoff CBN wurde mit der Wendeschnidplatte CCGW09T308-D-15S-2MC durchgeführt. Anhand von zwei Benchmark-Versuchen konnte festgestellt werden, dass die maximale Verschleißmarkenbreite (VB_{max}) von 200 μm nach einem Standweg l_f von 500 mm erreicht wird. Somit wurde diese Bearbeitungslänge für alle CBN-Versuche mit 500 mm definiert und diese der Reihe nach durchgeführt. Damit die Verschleißentwicklung an der Schneide in konstanten Abständen analysiert werden kann, wurden die Versuche alle 100 mm gestoppt, um Aufnahmen der Schneide und Messungen der Verschleißmarkenbreite durchzuführen. Die Auflistung der durchgeführten CBN-Versuchsvariationen sind in der nachfolgenden *Tabelle 6.13* aufgelistet:

		Versuche	Werkstoff	Kühlungsmethode
CBN	CCGW09T308 -A-15EW	1	GGG-60	IK
		1	GGG-60	IK+ MMS HD SE 1
		1	GGG-60	IK + MMS FA 2
	CCGW09T308 -A-15S-2MC	1	GGG-60	IK
		1	GGG-60	IK + MMS HD SE 1
		1	GGG-60	IK + MMS FA 2
	CCGW09T308 -D-15S-2MC	2	GGG-60	Überflutungskühlung

Tabelle 6.13: Auflistung der CBN-Versuche

Die Prozessparameter für die Versuchsdurchführung mit PKD-Wendeschnidplatten (insbesondere die Schnittgeschwindigkeit v_c) wurden unter Berücksichtigung der Vorgaben des Herstellers für vergleichbare Werkstoffe bereits in früheren Forschungsarbeiten ($v_c = 190$ m/min, $f = 0,3$ mm/U, $a_p = 0,3$ mm [13] sowie $v_c = 180$ m/min, $f = 0,07$ mm/U, $a_p = 1,2$ mm [14]) verwendeten Prozessparametern und durch Heranziehen von Prozessparametern für die Bearbeitung von GGG-60 mittels Hartmetallwerkzeugen festgelegt. Folgende Prozessparameter wurden schließlich für die experimentelle Untersuchung mit PKD-Wendeschnidplatten angewendet:

Vorschub f	0,28 mm/U
Schnitttiefe a_p	0,3 mm
Schnittgeschwindigkeit v_c	180 m/min

Tabelle 6.14: Prozessparameter der PKD-Wendeschnidplatten

Der Benchmark-Versuch für die Ermittlung des Standwegs l_f aller nachfolgenden PKD-Versuche wurde mit der Wendeschnidplatte CCGW09T308-PDC-CU-S durchgeführt. Die getroffene Auswahl dieser Wendeschnidplatte für den Benchmark-Versuch ist aufgrund ihrer besonders hohen Festigkeit gegenüber den sonst zur Auswahl stehenden PKD-Wendeschnidplatten zurückzuführen. Der Benchmark-Versuch hat nach der gewählten Bearbeitungslänge von 500 mm einen Verschleiß von 55 μm ergeben. Die sehr langsame Verschleißentwicklung an der Freifläche würde bei der zuvor festgelegten Verschleißmarkenbreite (VB_{max}) von 200 μm einen zu großen Standweg l_f ergeben. Um die Wirtschaftlichkeit nicht außer Acht zu lassen, wurde in diesem Fall eine Bearbeitungslänge von 500 mm festgelegt. Im Gegensatz zu den CBN-Versuchen wurden alle PKD-Versuche bereits nach den ersten 50 mm ein erstes Mal gestoppt und vermessen. In der nachfolgenden *Tabelle 6.15* sind alle durchgeführten PKD-Versuchsvariationen aufgelistet:

		Versuche	Werkstoff	Kühlungsmethode
PKD	CCGW09T308 -PDC-CU-S	1	GGG-60	Überflutungskühlung
		1	GGG-60	IK
		1	GGG-60	IK + MMS HD SE 1
		1	GGG-60	IK + MMS FA 2
	CCGW09T304 -PDC-CU-S	1	GGG-60	IK
		1	GGG-60	IK + MMS HD SE 1
		1	GGG-60	IK + MMS FA 2
	CCGT09T308 -PDC-S-CB2	1	GGG-60	IK
		1	GGG-60	IK + MMS HD SE 1
		1	GGG-60	IK + MMS FA 2
	CCGW09T308 -PDC	1	GGG-60	IK
		1	GGG-60	IK + MMS HD SE 1
		1	GGG-60	IK + MMS FA 2

Tabelle 6.15: Auflistung der PKD-Versuche

Während der Versuchsdurchführung blieben die Einstellungen des MMS-Gerätes für die externe Schmierung der CBN- und PKD-Wendeschnidplatten unverändert. Über das Bedienpult konnte die Prozessluft und die Düsenanzahl reguliert werden. Laut Hersteller soll bei kleinen Werkzeugen die Prozessluft auf der höchsten Stufe 3 betrieben werden. Die Menge an Aerosol wird über die Düsenanzahl gesteuert und ebenfalls auf Stufe 3 betrieben, um ein möglichst öereiches Aerosolgemisch zu erhalten. Anhand *Abbildung 6.14* werden die Einstellungen am Bedienpult veranschaulicht.



Abbildung 6.14: Einstellungen am Bedienpult des MMS-Gerätes

7 Auswertung der Versuchsergebnisse

Die Daten für die Auswertung und Gegenüberstellung der Wendeschneidplatten wurden über die Vermessung des Freiflächenverschleißes (siehe Kapitel 2.1.6) bzw. der Verschleißmarkenbreite (VB) unter Verwendung eines Lichtmikroskops (siehe Kapitel 2.5.1) erhoben. Mit Hilfe der Fokusvariation (siehe Kapitel 2.5.2) konnten hochauflösende Aufnahmen der Schneide gemacht werden. Für eine genauere Analyse der Verschleißentwicklung an der Wendeschneidplatte wurde neben der Freifläche auch Aufnahmen der Spanfläche gemacht und qualitativ bewertet. Die folgende *Abbildung 7.1* zeigt beispielhaft die Datenerhebung mittels Vermessung der maximalen Verschleißmarkenbreite VB_{max} an einer Wendeschneidplatte vom Typ CCGW09T308-A-15EW.

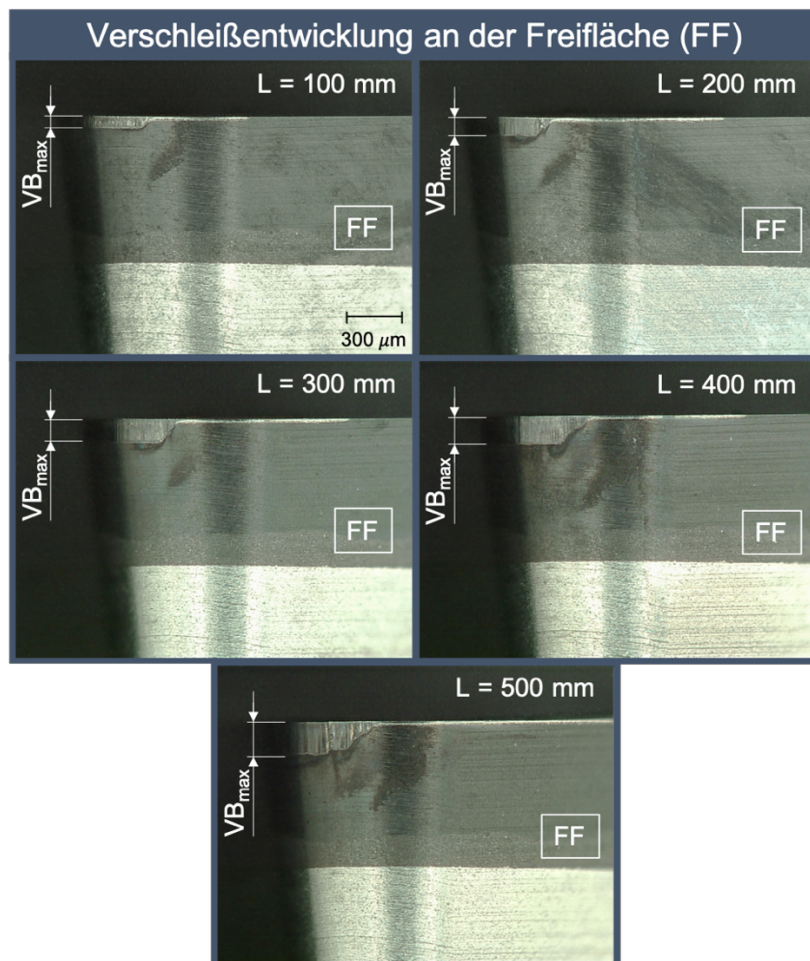


Abbildung 7.1: Vermessung der maximalen Verschleißmarkenbreite (VB_{max})

7.1 Versuchsergebnisse für CBN

7.1.1 Auswertung – CCGW09T308-D-15S-2MC

Werkstückwerkstoff:	GGG-60	WSP: CCGW09T308-D-15S-2MC	
Schnittgeschwindigkeit v_c :	600 m/min	Eckenradius r_ϵ :	0,8 mm
Zustelltiefe a_p :	0,3 mm	Dicke CBN-Blank:	0,8 mm
Vorschub f :	0,28 mm/U	CBN-Gehalt:	90%
Überflutungskühlung:	3600 ml/min	Kantenausführung:	Negativ-Fase
		Beschichtung:	mit

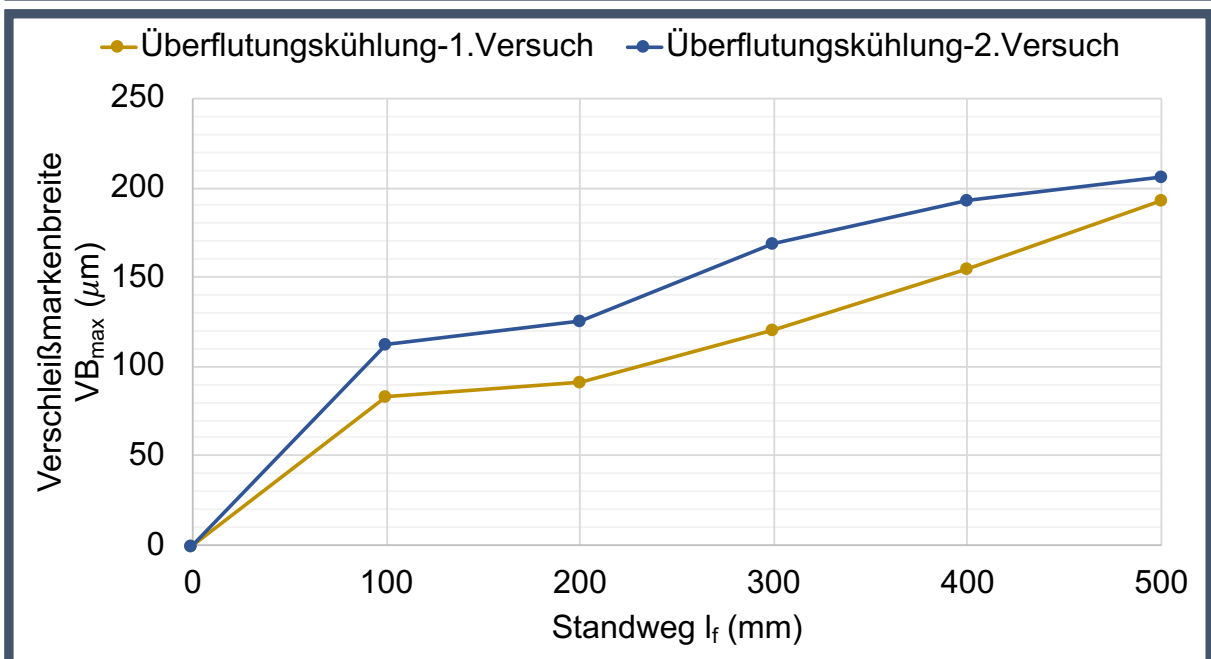


Abbildung 7.2: Auswertung der Verschleißentwicklung für CCGW09T308-D-15S-2MC

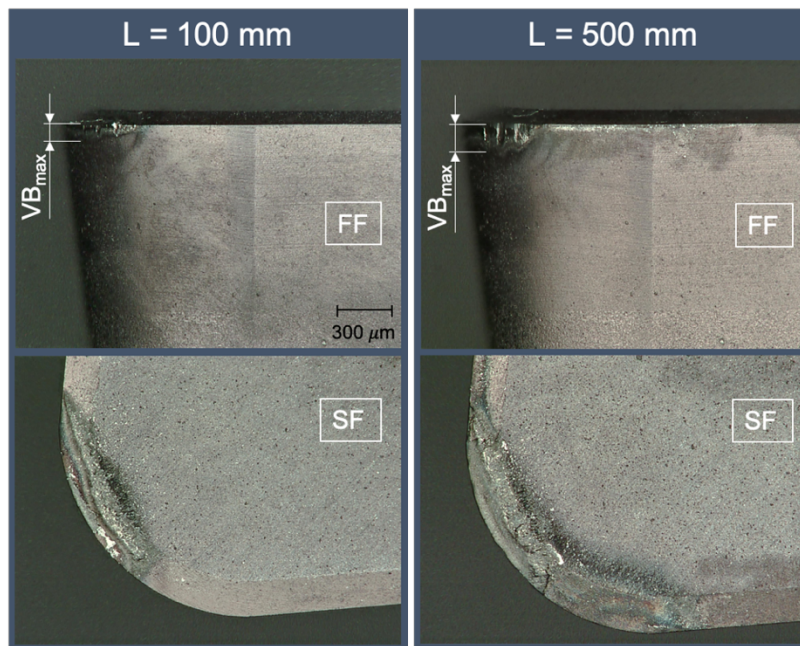


Abbildung 7.3: Verschleißaufnahmen CCGW09T308-D-15S-2MC (Überflutungskühlung-1.Versuch)

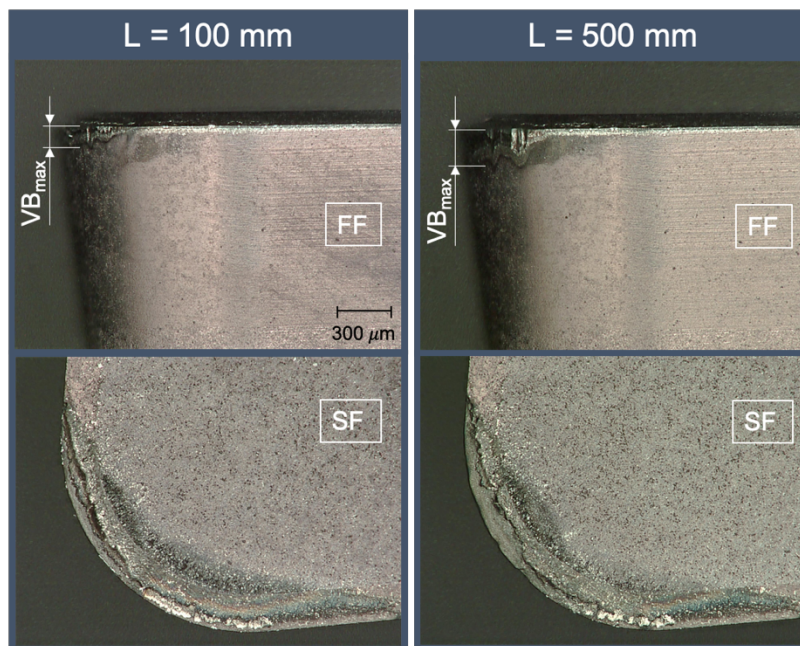


Abbildung 7.4: Verschleißaufnahmen CCGW09T308-D-15S-2MC (Überflutungskühlung-2.Versuch)

7.1.2 Auswertung – CCGW09T308-A-15EW

Werkstückwerkstoff:	GGG-60	WSP: CCGW09T308-A-15EW	
Schnittgeschwindigkeit v_c :	600 m/min	Eckenradius r_e :	0,8 mm
Zustelltiefe a_p :	0,3 mm	Dicke CBN-Blank:	0,8 mm
Vorschub f :	0,28 mm/U	CBN-Gehalt:	90%
Innenkühlung:	600 ml/min	Kantenausführung:	Standard
		Beschichtung:	ohne

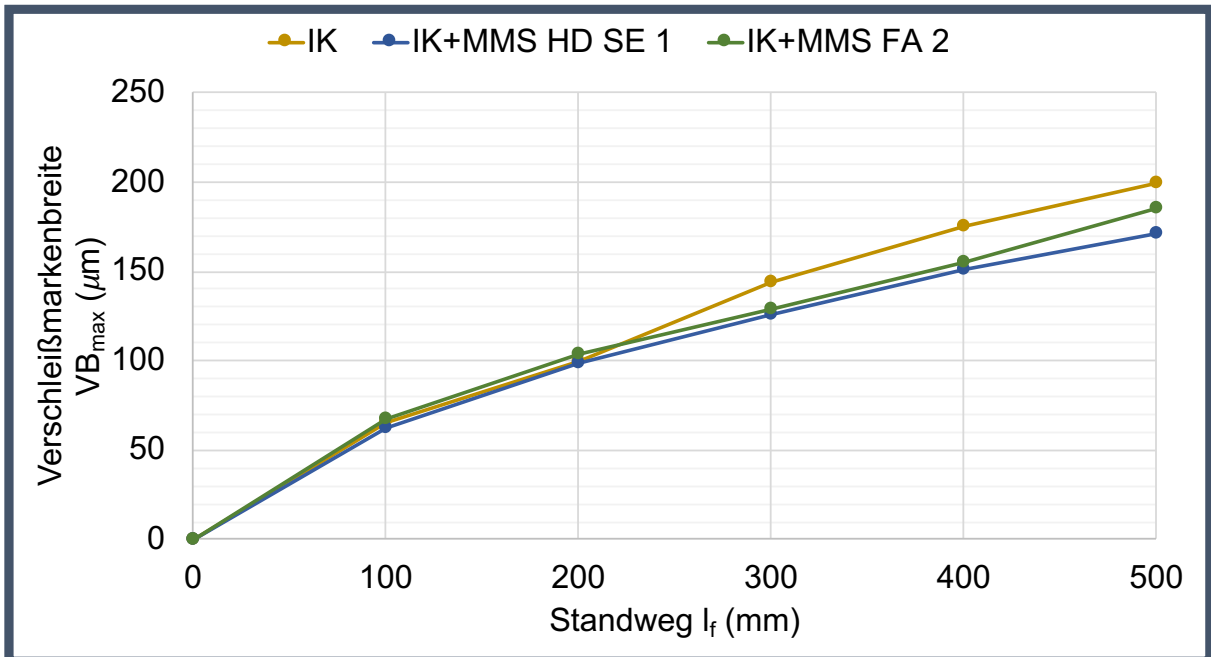


Abbildung 7.5: Auswertung der Verschleißentwicklung für CCGW09T308-A-15EW

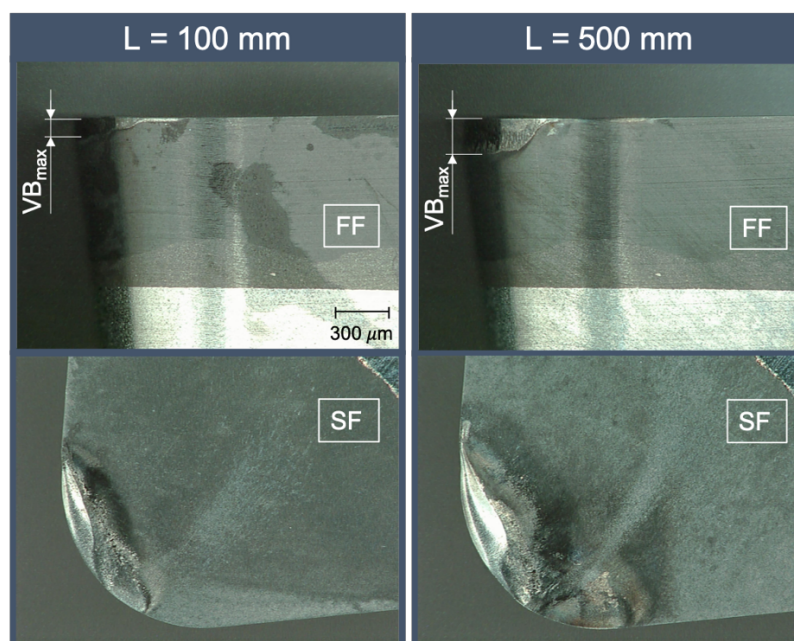


Abbildung 7.6: Verschleißaufnahmen CCGW09T308-A-15EW (IK)

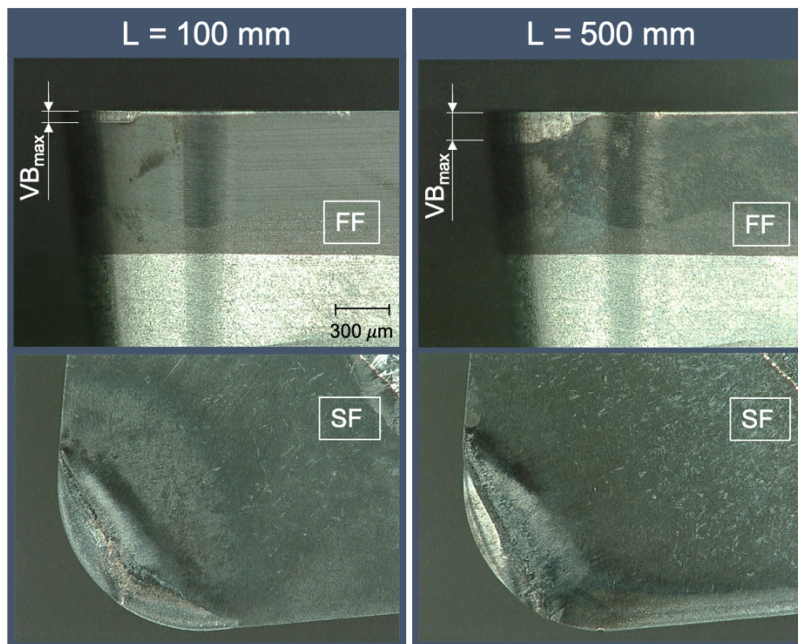


Abbildung 7.7: Verschleißaufnahmen CCGW09T308-A-15EW
(IK+MMS HD SE 1)

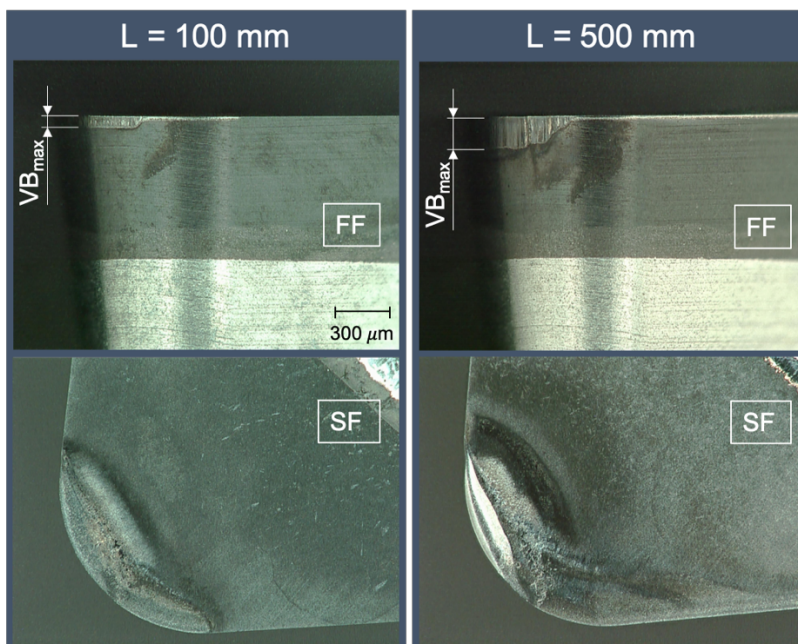


Abbildung 7.8: Verschleißaufnahmen CCGW09T308-A-15EW
(IK+MMS FA 2)

7.1.3 Auswertung – CCGW09T308-A-15S-2MC

Werkstückwerkstoff:	GGG-60	WSP: CCGW09T308-A-15S-2MC	
Schnittgeschwindigkeit v_c :	600 m/min	Eckenradius r_ϵ :	0,8 mm
Zustelltiefe a_p :	0,3 mm	Dicke CBN-Blank:	0,8 mm
Vorschub f :	0,28 mm/U	CBN-Gehalt:	90%
Innenkühlung:	600 ml/min	Kantenausführung:	Standard
		Beschichtung:	mit

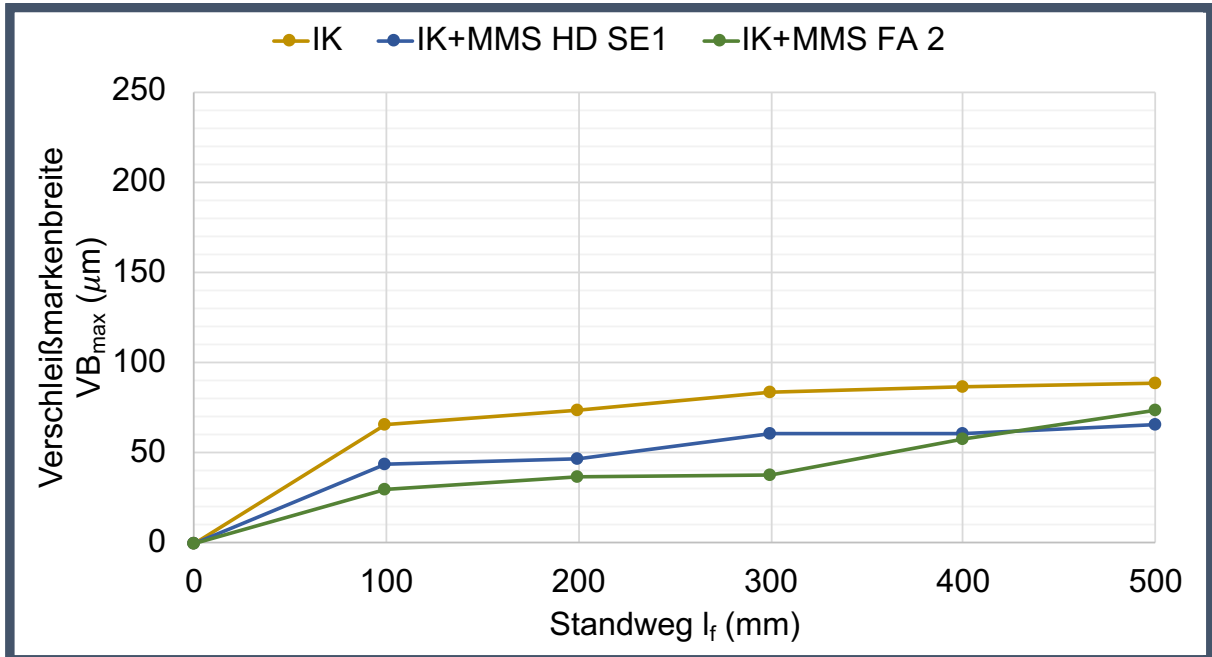


Abbildung 7.9: Auswertung der Verschleißentwicklung für CCGW09T308-A-15S-2MC

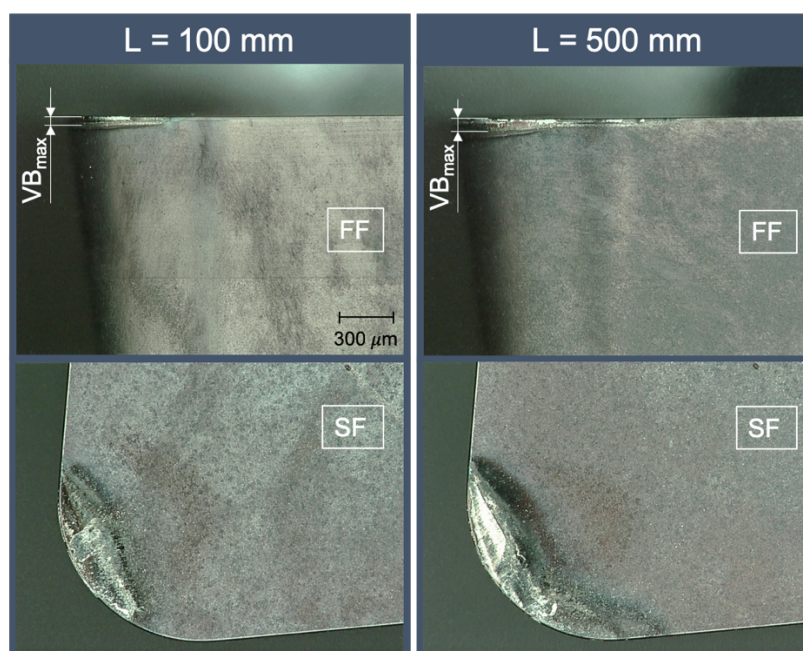


Abbildung 7.10: Verschleißaufnahmen CCGW09T308-A-15S-2MC (IK)

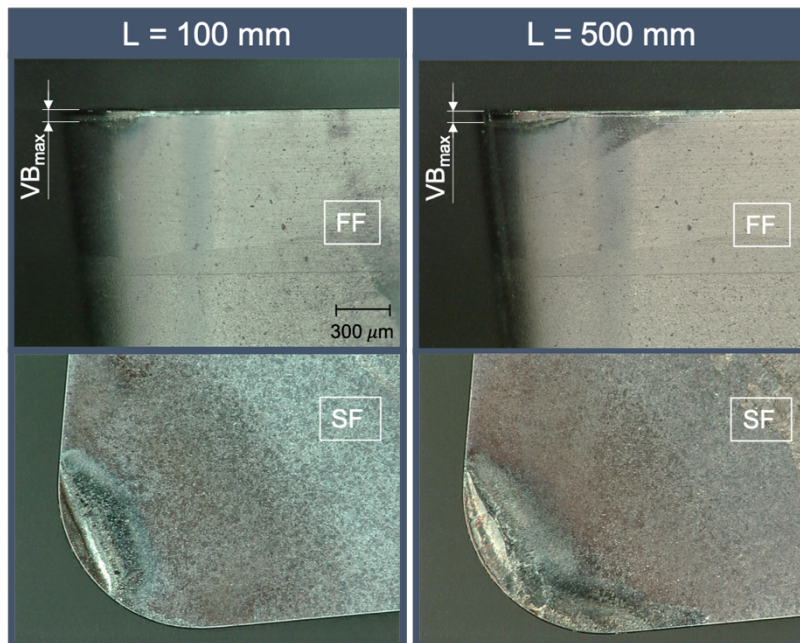


Abbildung 7.11: Verschleißaufnahmen CCGW09T308-A-15S-2MC (IK+MMS HD SE 1)

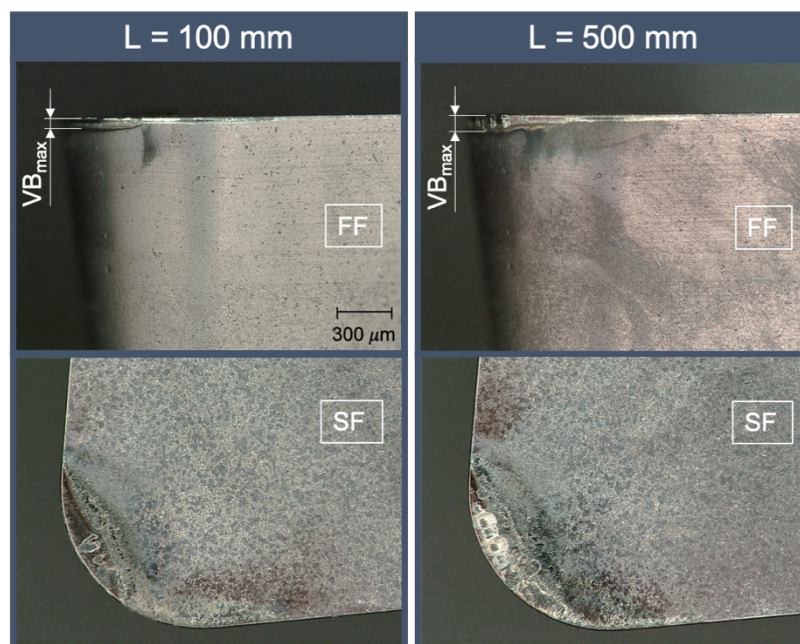


Abbildung 7.12: Verschleißaufnahmen CCGW09T308-A-15S-2MC (IK+MMS FA 2)

7.1.4 Fazit der CBN-Versuchsergebnisse

Anhand der ermittelten CBN-Versuchsergebnisse kann zunächst eine allgemeine Aussage bezüglich der experimentell untersuchten Kühlmethoden getroffen werden. Die Untersuchungsergebnisse aller CBN-Wendeschnidplatten zeigen, dass die entwickelte Kühlmethode (IK+MMS) gegenüber der reinen Innenkühlung (IK) und der Überflutungskühlung die besten Ergebnisse hinsichtlich der Verschleißentwicklung an der Freifläche liefert (siehe *Abbildung 7.2/ 7.5/ 7.9*).

Um eine genauere Aussage über die unterschiedlichen Kühlmethoden und deren Einfluss auf das Verschleißverhalten treffen zu können, müssen die Eigenschaften der eingesetzten CBN-Wendeschnidplatten, die bereits im Kapitel 6.1.1 beschrieben wurden, berücksichtigt werden. Die grundsätzlichen Unterschiede zwischen den drei CBN-Wendeschnidplatten liegen in der Schneidkantenausführung (siehe *Tabelle 6.1 bis 6.3* und *Abbildung 6.1 bis 6.3*) und der Beschichtung. Für die Gegenüberstellung der CBN-Wendeschnidplatten wird die Auswertung aus dem Benchmark-Versuch mit der Wendeschnidplatte CCGW09T308-D-15S-2MC (siehe *Abbildung 7.2*) für alle CBN-Versuche als Vergleichsbasis herangezogen.

Die erste Gegenüberstellung wird für die Auswertung des Benchmark-Versuchs (*Abbildung 7.2*) und die Auswertung der Wendeschnidplatte CCGW09T308-A-15EW (*Abbildung 7.5*) durchgeführt. Diese beiden Wendeschnidplatten unterscheiden sich in der Schneidkantenausführung und der Ausführung mit bzw. ohne Beschichtung. Im ersten Moment sind die eher unüblichen Verschleißverläufe der Wendeschnidplatte CCGW09T308-A-15EW, die nahezu linear ansteigend verlaufen, sehr auffallend. Darüber hinaus sind keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf den Freiflächenverschleiß zwischen den unterschiedlichen Kühlmethoden festzustellen. Die Verschleißmarkenbreite der Variante mit Innenkühlung (IK) und jene der Überflutungskühlung sind nach einem Standweg l_f von 500 mm beinahe ident. Ein zwar nicht erhebliches, aber dennoch besseres Verschleißverhalten kann die innovative Kühlung (IK+MMS) gegenüber der Überflutungskühlung aufweisen. Die unbeschichtete Wendeschnidplatte CCGW09T308-A-15EW mit einer Standard-Schneidkantenausführung erreicht nach 500 mm Standweg l_f für beide MMS-Sorten einen minimal geringeren Verschleiß an der Freifläche.

Die zweite Gegenüberstellung wird für die Auswertung des Benchmark-Versuches (*Abbildung 7.2*) und die Auswertung der Wendeschnidplatte CCGW09T308-A15S-2MC (*Abbildung 7.9*) getroffen. In diesem Fall unterscheiden sich die beiden Wendeschnidplatten lediglich durch die Schneidkantenausführung. Es ist deutlich erkennbar, dass sich die Verschleißverläufe der Wendeschnidplatte CCGW09T308-A15S-2MC im Gegensatz zur Überflutungskühlung in einem geringeren Bereich zeigt. Zudem erzielt diese Wendeschnidplatte unter allen

untersuchten CBN-Wendeschnidplatten, sowohl für die Innenkühlung (IK) als auch für die Kühlmethode (IK+MMS), die besten Verschleißergebnisse. Der nach 500 mm Standweg l_f entstandene Freiflächenverschleiß hat sich gegenüber der Überflutungskühlung um mehr als 50 Prozent verringert.

Die deutlichen Unterschiede im Verschleißverhalten von Wendeschnidplatte CCGW09T308-A-15EW (*Abbildung 7.5*) im Vergleich zu Wendeschnidplatte CCGW09T308-A15S-2MC (*Abbildung 7.9*), unabhängig von der jeweiligen Ausführung der Kühlung, lässt sich auf die nicht vorhandene Beschichtung des zweiten WSP-Typs zurückführen.

Die entwickelte Kühlmethode, welche mit jeweils zwei unterschiedlichen MMS-Sorten (HD SE 1 und FA 2) in den CBN-Versuchen erprobt wurde, muss ebenso hinsichtlich verwendeter MMS-Sorte analysiert werden. Sowohl bei der Versuchsauswertung der Wendeschnidplatte CCGW09T308-A-15EW als auch der Wendeschnidplatte CCGW09T308-A15S-2MC ist erkennbar, dass nach einem Standweg l_f von 500 mm die MMS-Sorte HD SE 1 gegenüber der MMS-Sorte FA 2 die geringere Verschleißmarkenbreite aufweist, wenn auch nur in geringem Maße. Es ließe sich zudem eine flachere Entwicklungskurve des Freiflächenverschleißes für die MMS-Sorte HD SE 1 (im Vergleich zu MMS-Sorte FA 2) erahnen, ohne dies ausreichend statistisch belegen zu können. Ebenfalls kann festgehalten werden, dass die Verschleißerscheinungen an der Spanfläche der oben genannten Wendeschnidplatten (siehe *Abbildung 7.6/ 7.7/ 7.11/ 7.12*) bei Verwendung von MMS HD SE 1 langsamer fortschreitet.

7.2 Versuchsergebnisse für PKD

7.2.1 Auswertung – CCGW09T308-PDC-CU-S

Werkstückwerkstoff:	GGG-60	WSP: CCGW09T308-PDC-CU-S	
Schnittgeschwindigkeit v_c :	180 m/min	Eckenradius r_ε :	0,8 mm
Zustelltiefe a_p :	0,3 mm	Dicke PKD-Blank:	1,4 mm
Vorschub f :	0,28 mm/U	Korngröße:	20-35 μm
Überflutungskühlung:	3600 ml/min	Kantenausführung:	Standard
Innenkühlung:	600 ml/min		

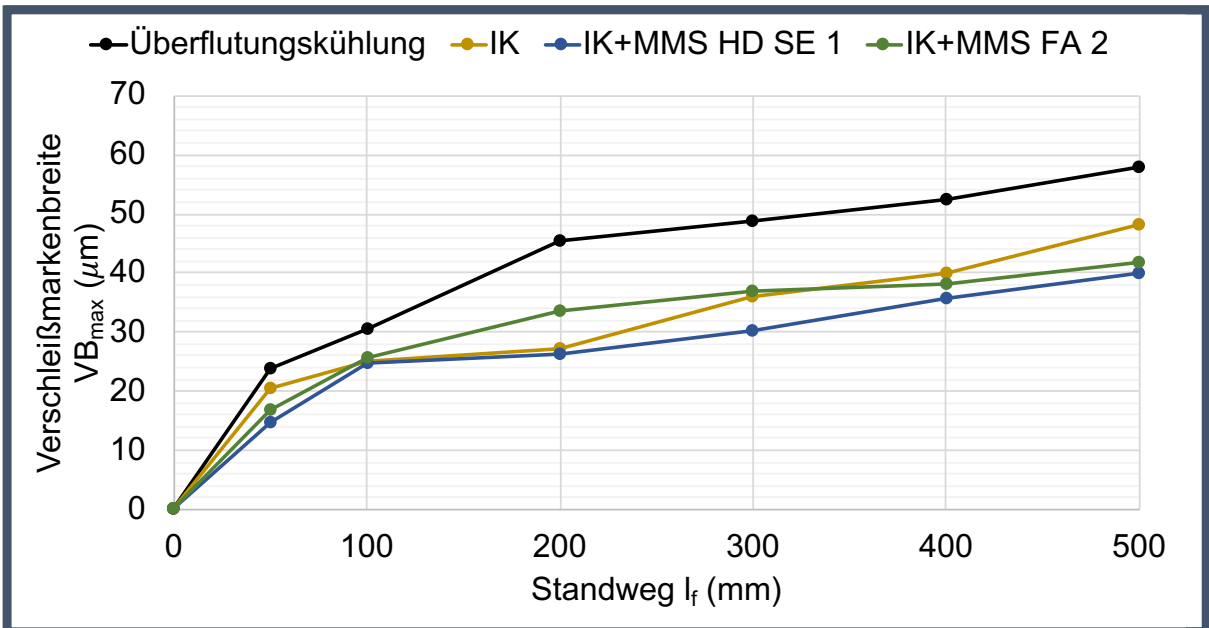


Abbildung 7.13: Auswertung der Verschleißentwicklung für CCGW09T308-PDC-CU-S

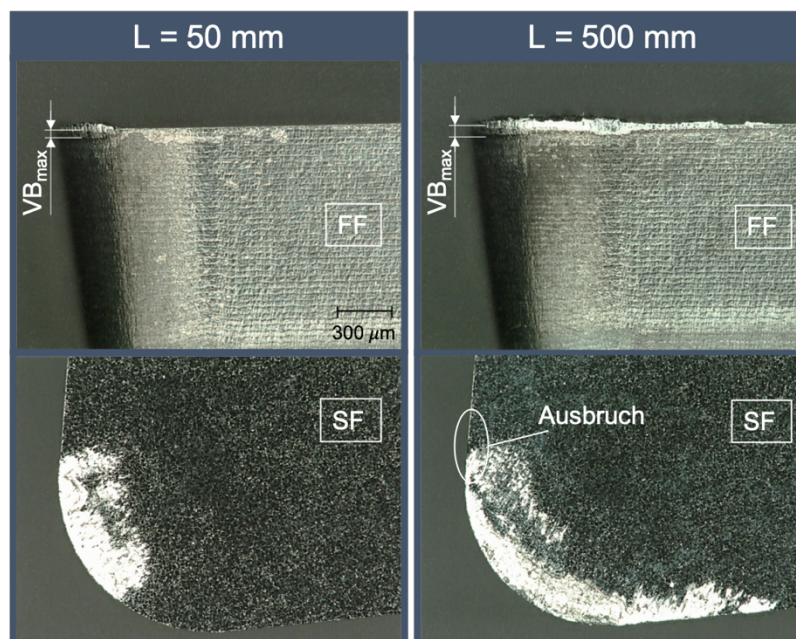


Abbildung 7.14: Verschleißaufnahmen CCGW09T308-PDC-CU-S (IK)

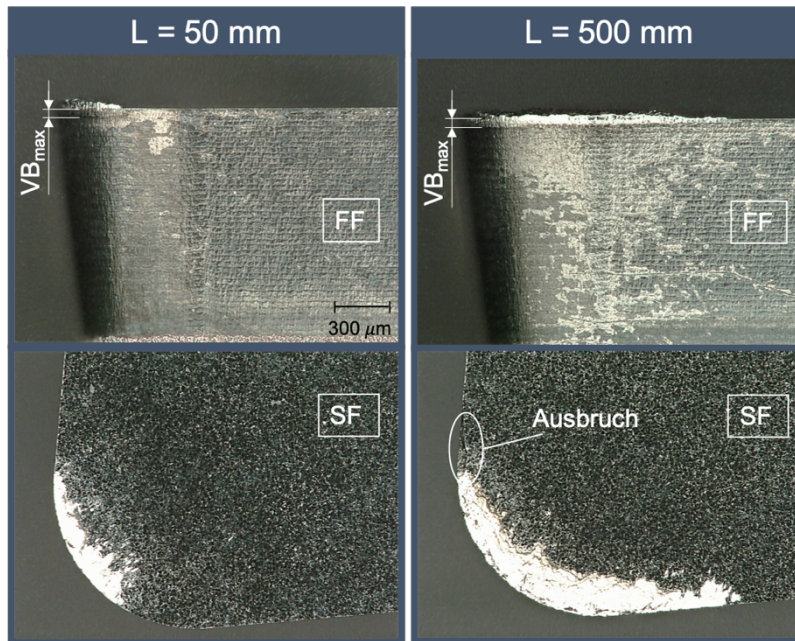


Abbildung 7.15: Verschleißaufnahmen CCGW09T308-PDC-CU-S (IK+MMS HD SE 1)

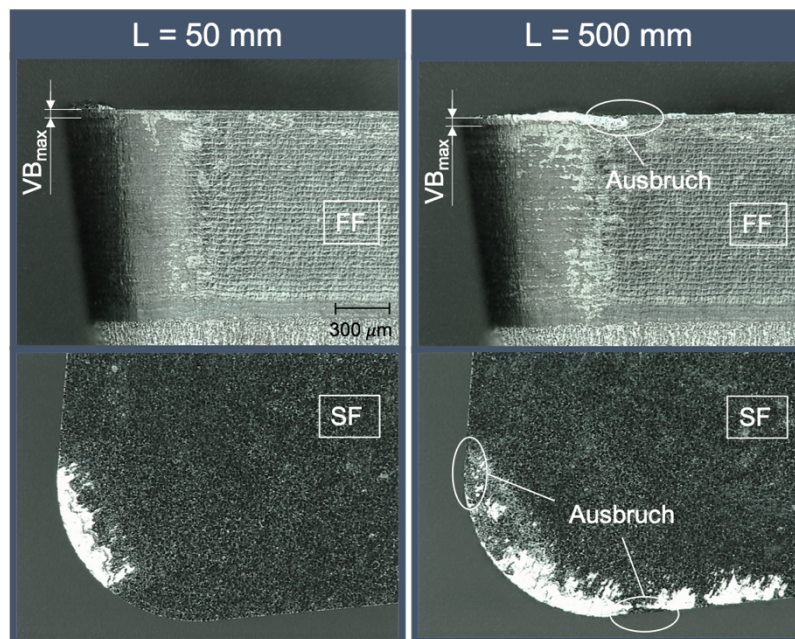


Abbildung 7.16: Verschleißaufnahmen CCGW09T308-PDC-CU-S (IK+MMS FA 2)

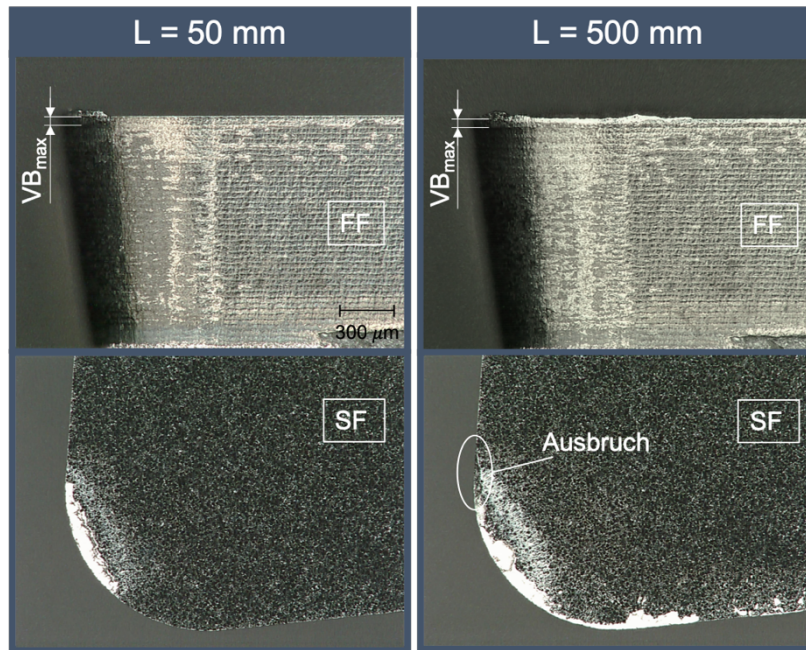


Abbildung 7.17: Verschleißaufnahmen CCGW09T308-PDC-CU-S (Überflutungskühlung)

Die Entstehung der sichtbaren Ausbrüche in den Aufnahmen nach Abschluss der Versuchsdurchführung (Abbildungen 7.14 bis 7.17) ist auf den folgenden Abbildungen 7.18 bis 7.19 nochmals im ersten erkennbaren Zwischenstadium dargestellt.

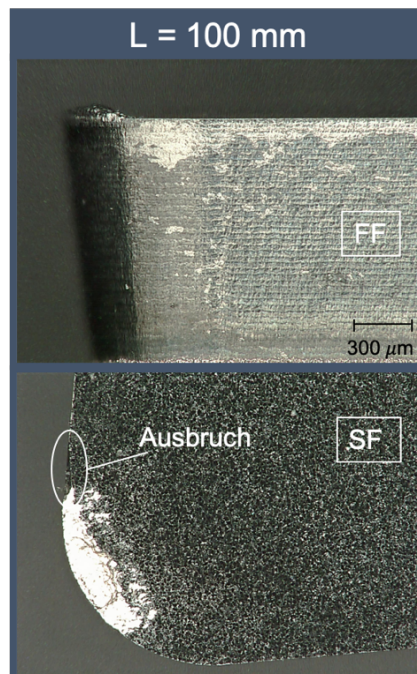


Abbildung 7.18: Entstehung eines Ausbruchs CCGW09T308-PDC-CU-S (IK+MMS HD SE 1)

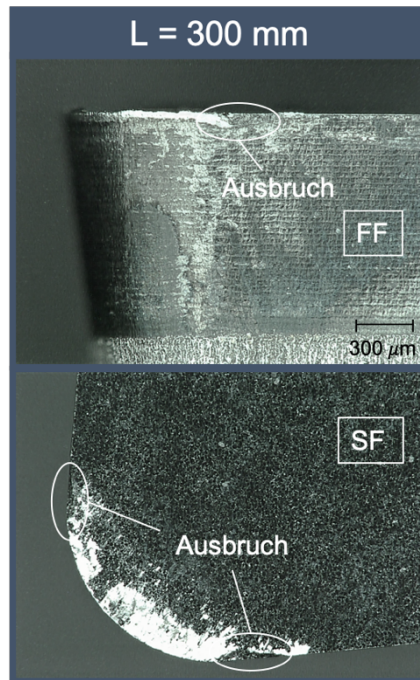


Abbildung 7.19: Entstehung eines Ausbruchs CCGW09T308-PDC-CU-S (IK+MMS FA 2)

7.2.2 Auswertung – CCGW09T304-PDC-CU-S

Werkstückwerkstoff:	GGG-60	WSP: CCGW09T304-PDC-CU-S	
Schnittgeschwindigkeit v_c :	180 m/min	Eckenradius r_ϵ :	0,4 mm
Zustelltiefe a_p :	0,3 mm	Dicke PKD-Blank:	1,4 mm
Vorschub f :	0,28 mm/U	Korngröße:	20-35 μm
Innenkühlung:	600 ml/min	Kantenausführung:	Standard

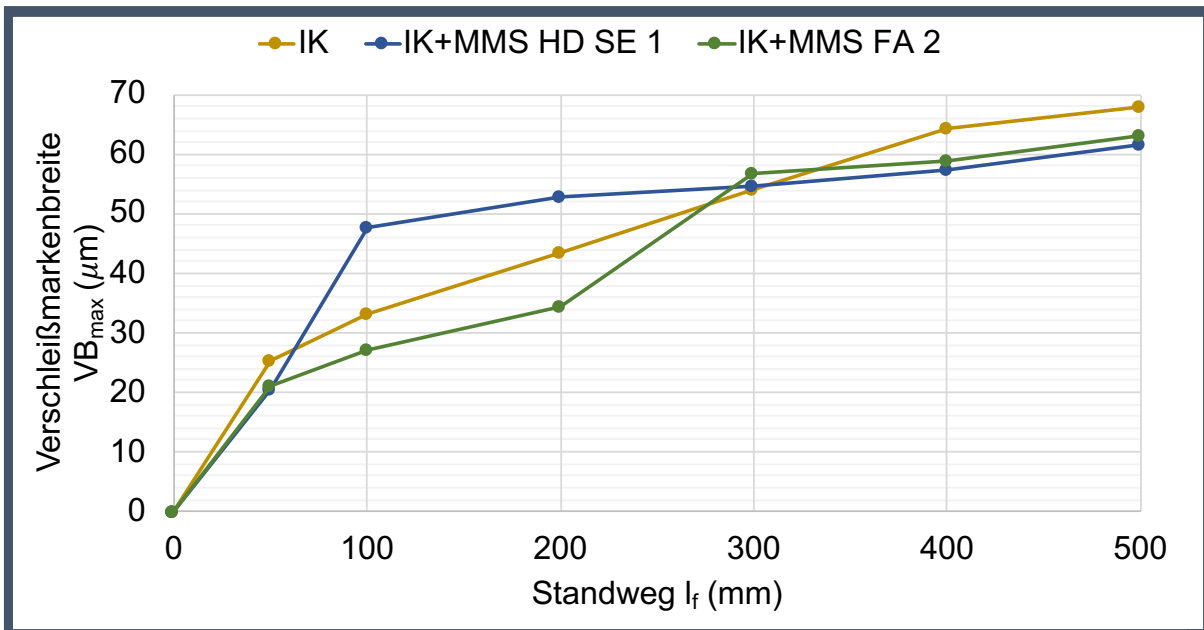


Abbildung 7.20: Auswertung der Verschleißentwicklung für CCGW09T304-PDC-CU-S

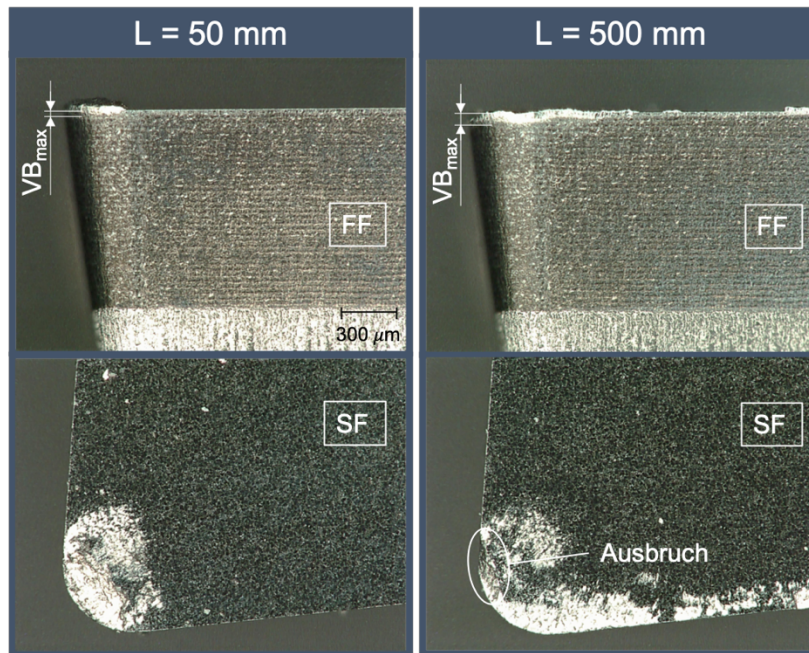


Abbildung 7.21: Verschleißaufnahmen CCGW09T304-PDC-CU-S (IK)

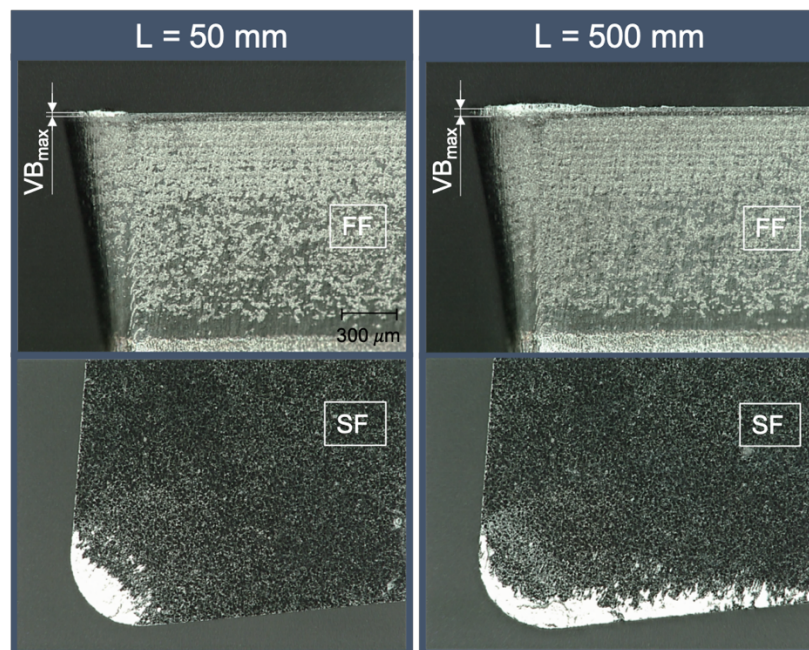


Abbildung 7.22: Verschleißaufnahmen CCGW09T304-PDC-CU-S
(IK+MMS HD SE 1)

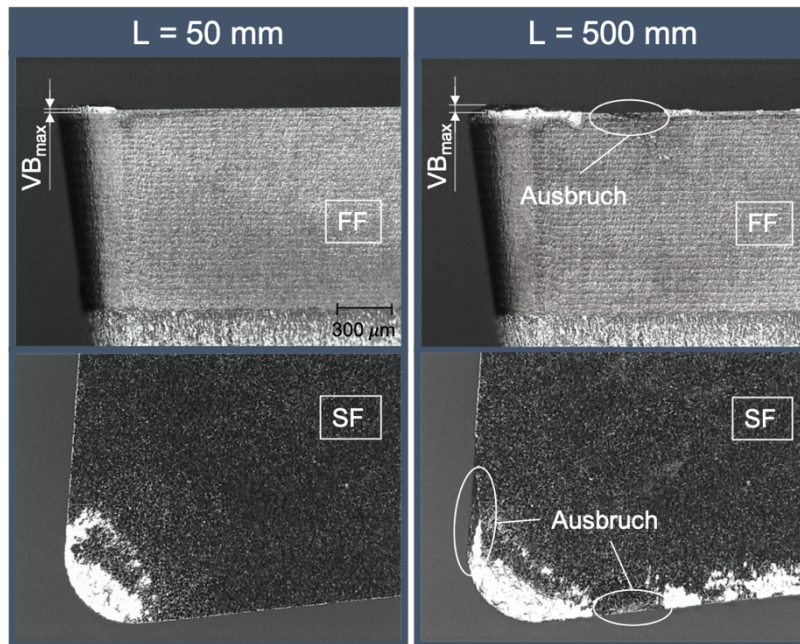


Abbildung 7.23: Verschleißaufnahmen CCGW09T304-PDC-CU-S (IK+MMS FA 2)

Die Entstehung der sichtbaren Ausbrüche in den Aufnahmen nach Abschluss der Versuchsdurchführung (Abbildungen 7.21 bis 7.23) ist auf den folgenden Abbildungen 7.24 bis 7.26 nochmals im ersten erkennbaren Zwischenstadium dargestellt.

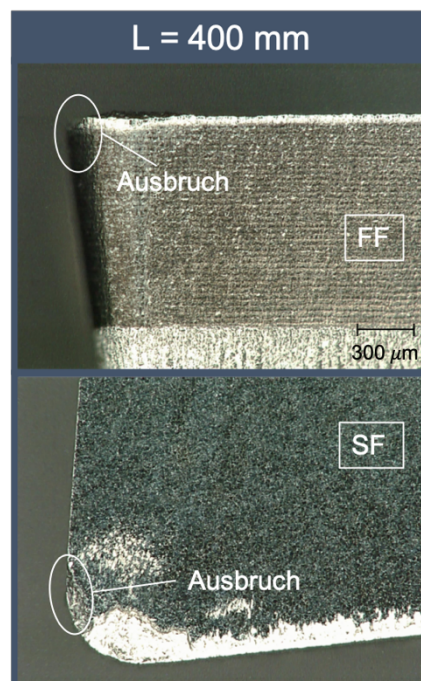


Abbildung 7.24: Entstehung eines Ausbruchs CCGW09T304-PDC-CU-S (IK)

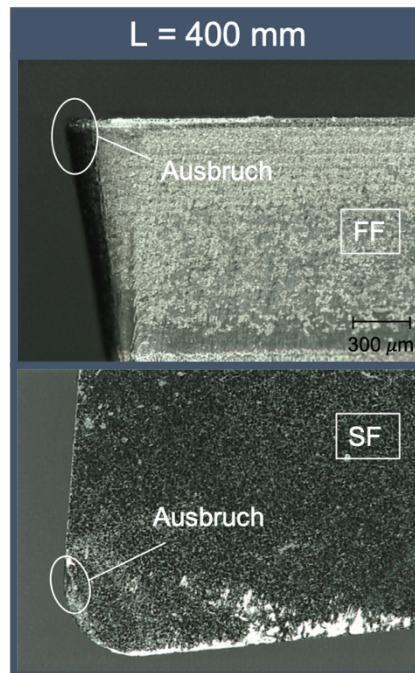


Abbildung 7.25: Entstehung eines Ausbruchs
CCGW09T304-PDC-CU-S (IK+MMS HD SE 1)

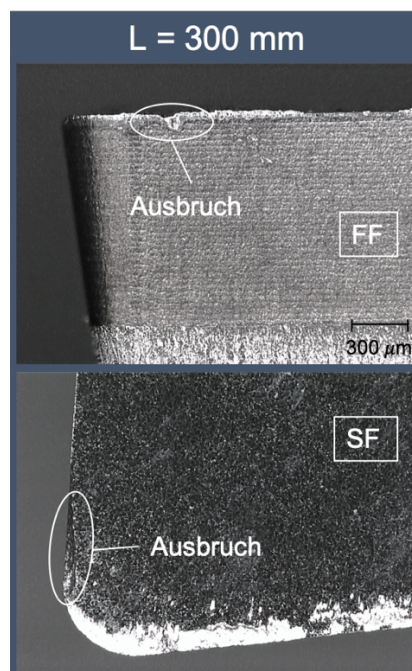


Abbildung 7.26: Entstehung eines Ausbruchs
CCGW09T304-PDC-CU-S (IK+MMS FA 2)

7.2.3 Auswertung – CCGW09T308-PDC

Werkstückwerkstoff:	GGG-60	WSP: CCGW09T308-PDC	
Schnittgeschwindigkeit v_c :	180 m/min	Eckenradius r_ϵ :	0,8 mm
Zustelltiefe a_p :	0,3 mm	Dicke PKD-Blank:	0,6 mm
Vorschub f :	0,28 mm/U	Korngröße:	2-4 μm
Innenkühlung:	600 ml/min	Kantenausführung:	Standard

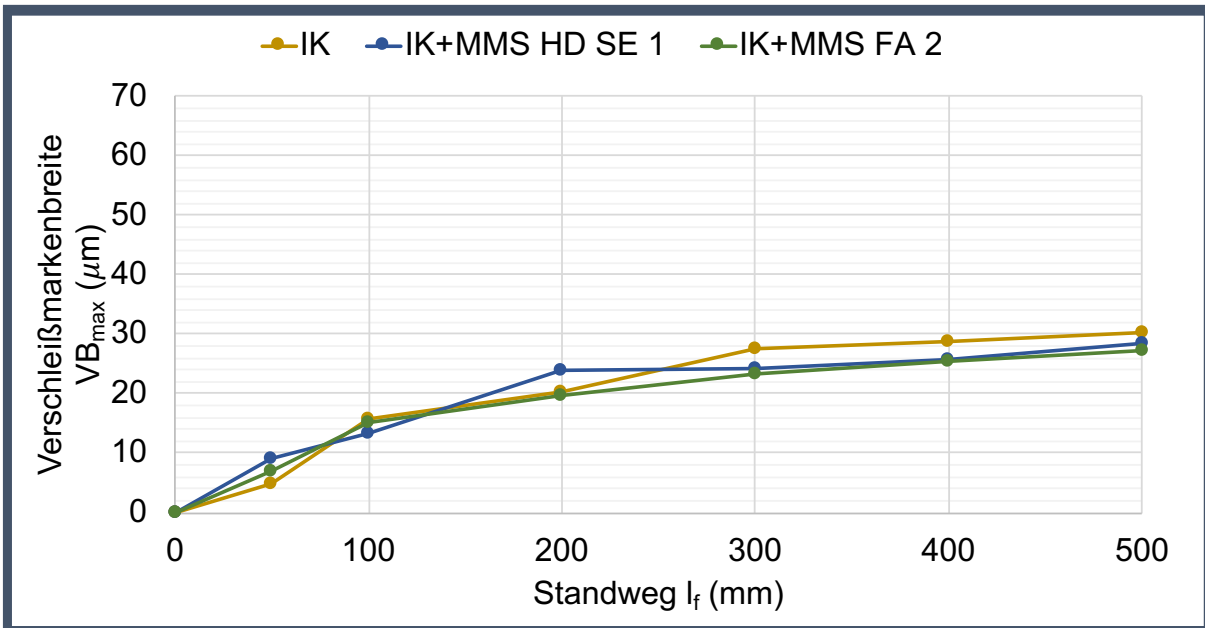


Abbildung 7.27: Auswertung der Verschleißentwicklung für CCGW09T308-PDC

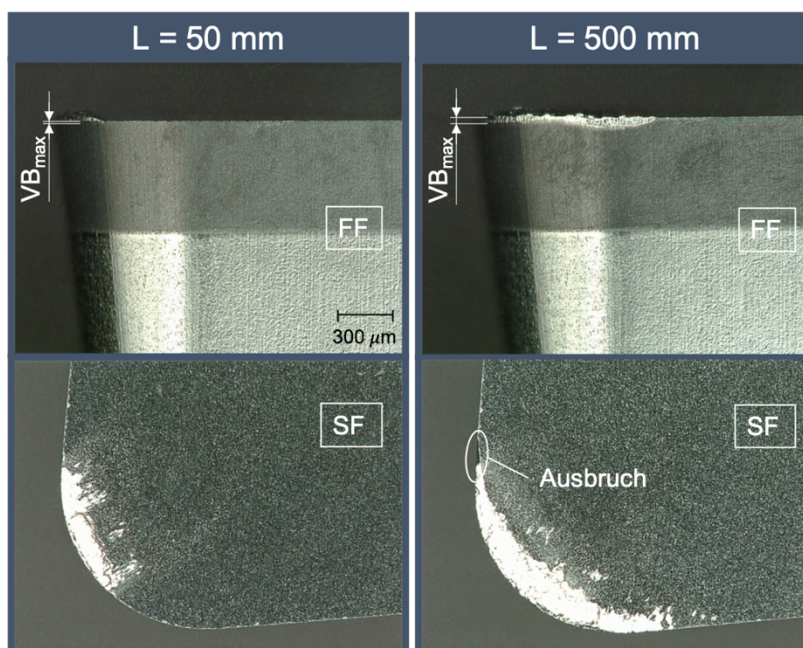


Abbildung 7.28: Verschleißaufnahmen CCGW09T308-PDC (IK)

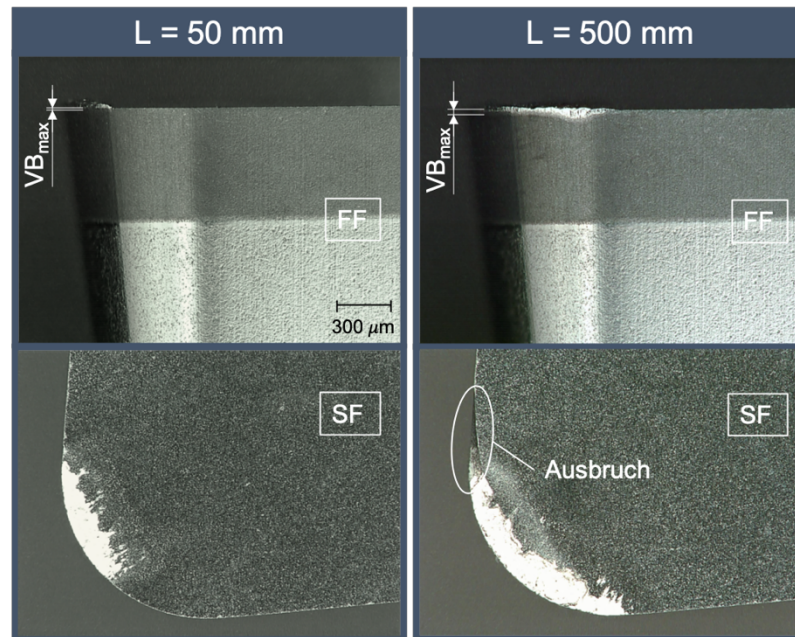


Abbildung 7.29: Verschleißaufnahmen CCGW09T308-PDC
(IK+MMS HD SE 1)

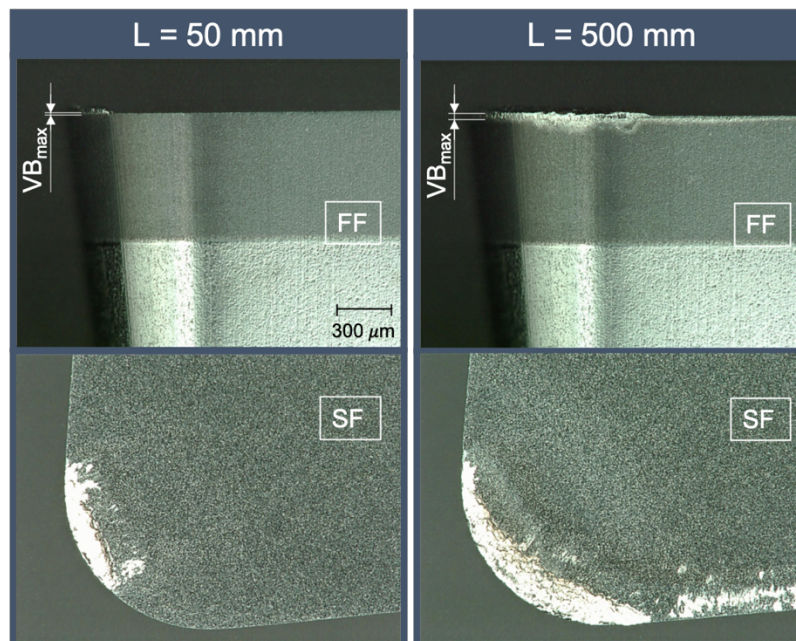


Abbildung 7.30: Verschleißaufnahmen CCGW09T308-PDC
(IK+MMS FA 2)

Die Entstehung der sichtbaren Ausbrüche in den Aufnahmen nach Abschluss der Versuchsdurchführung (Abbildungen 7.28 bis 7.30) ist auf den folgenden Abbildungen 7.31 bis 7.33 nochmals im ersten erkennbaren Zwischenstadium dargestellt.

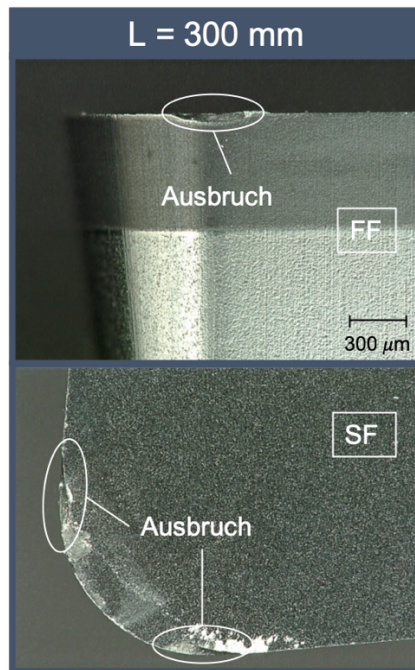


Abbildung 7.31: Entstehung eines Ausbruchs
Verschleißaufnahmen CCGW09T308-PDC (IK)

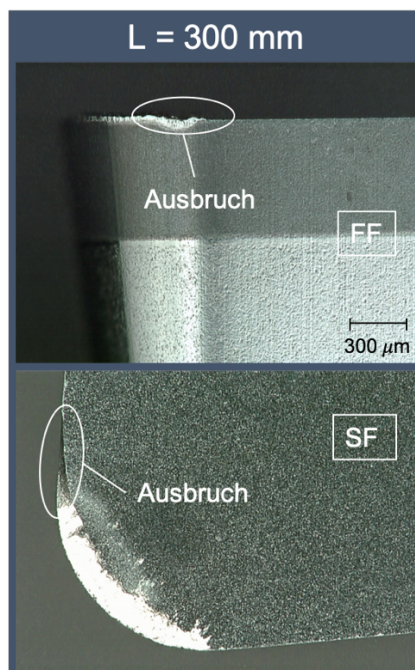


Abbildung 7.32: Entstehung eines Ausbruchs
CCGW09T308-PDC (IK+MMS HD SE 1)

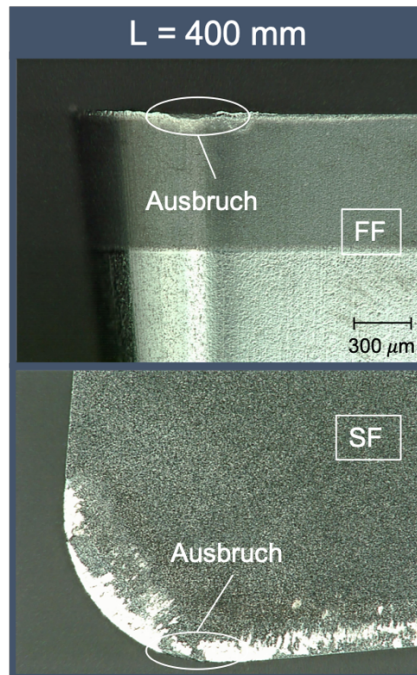


Abbildung 7.33: Entstehung eines Ausbruchs
CCGW09T308-PDC (IK+MMS FA 2)

7.2.4 Auswertung – CCGT09T308-PDC-S-CB2

Werkstückwerkstoff:	GGG-60	WSP: CCGT09T308-PDC-S-CB2
Schnittgeschwindigkeit v_c :	180 m/min	Eckenradius r_ϵ : 0,8 mm
Zustelltiefe a_p :	0,3 mm	Dicke PKD-Blank: 0,6 mm
Vorschub f :	0,28 mm/U	Korngröße: 8-10 μm
Innenkühlung:	600 ml/min	Kantenausführung: Negativ-Fase
		Besonderheit: Spanbrecher

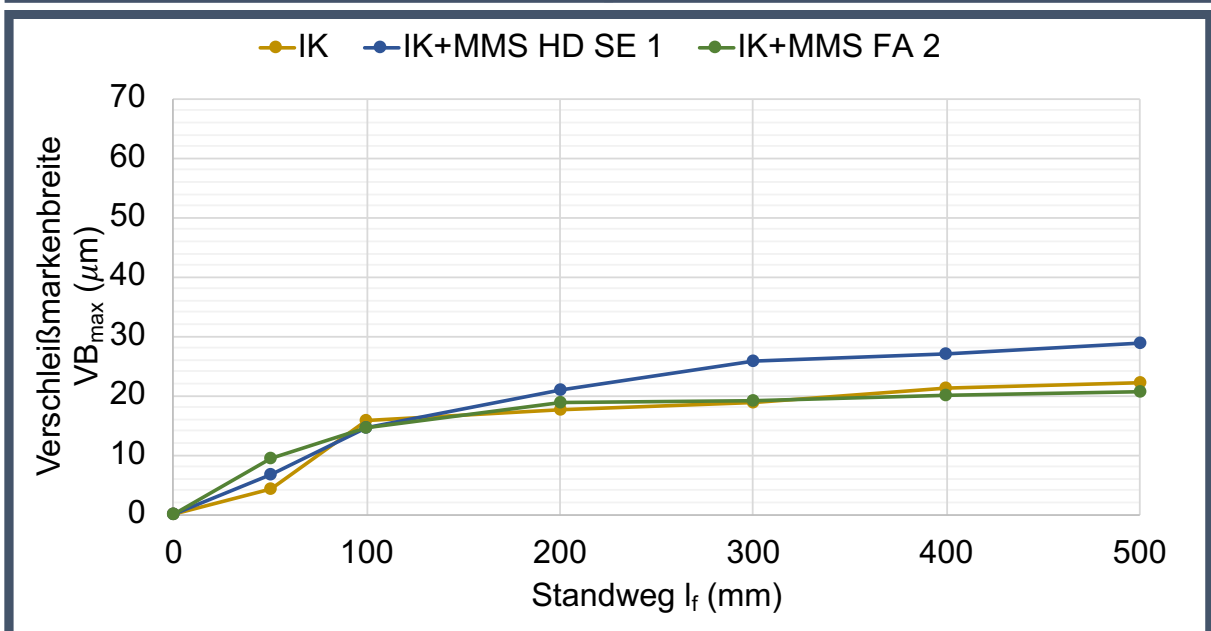


Abbildung 7.34: Auswertung der Verschleißentwicklung für CCGT09T308-PDC-S-CB2

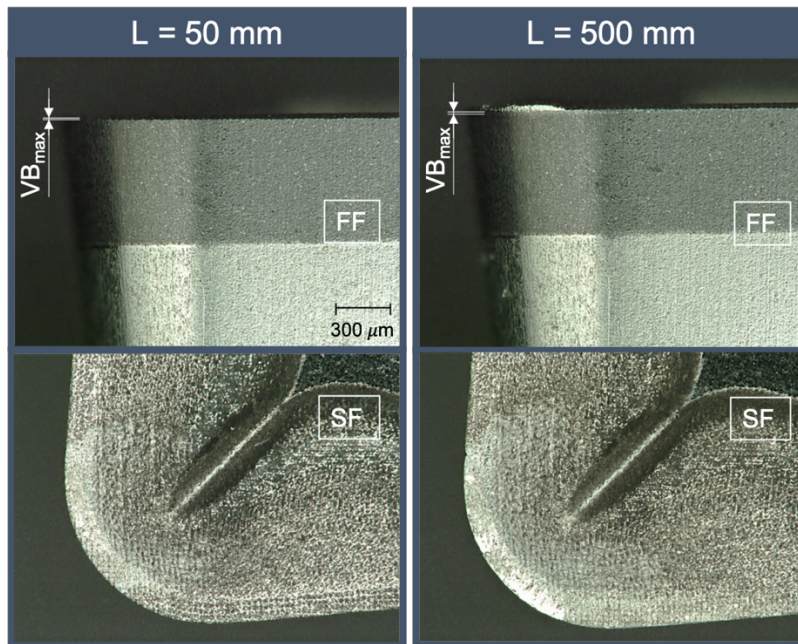


Abbildung 7.35: Verschleißaufnahmen CCGT09T308-PDC-S-CB2 (IK)

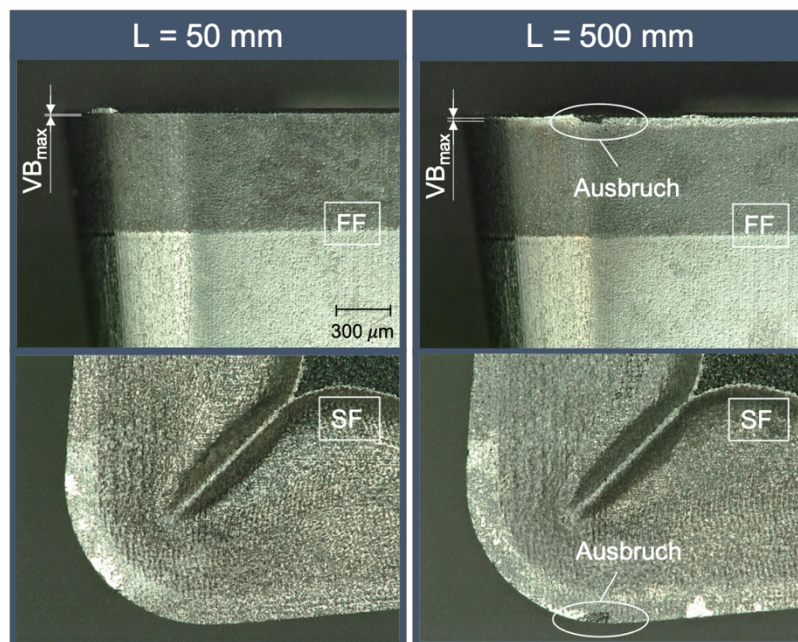


Abbildung 7.36: Verschleißaufnahmen CCGT09T308-PDC-S-CB2 (IK+MMS HD SE 1)

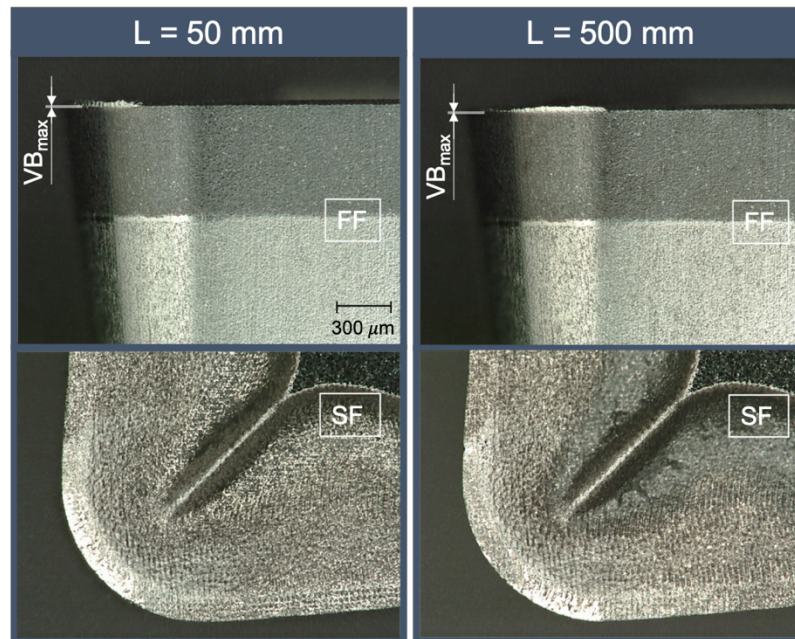


Abbildung 7.37: Verschleißaufnahmen CCGT09T308-PDC-S-CB2
(IK+MMS FA 2)

7.2.5 Fazit der PKD-Versuchsergebnisse

Der Benchmark-Versuch wurde wie zuvor schon für CBN mit Überflutungskühlung durchgeführt. Hierfür kam die PKD-Wendeschneidplatte CCGW09T308-PDC-CU-S zum Einsatz. Dieser Typ weist zugleich auch die höchste Festigkeit unter allen untersuchten PKD-Sorten auf und hat eine PKD-Blankdicke von 1,4 mm. In weiterer Folge wird für die Gegenüberstellung der PKD-Wendeschneidplatten der Benchmark-Versuch als Vergleichsbasis herangezogen (Abbildung 7.13).

Zunächst erfolgt die Beurteilung der Wendeschneidplatte CCGW09T308-PDC-CU-S (Abbildung 7.13), mit der sowohl der Benchmark-Versuch, die Innenkühlung (IK) als auch die entwickelte Kühlung (IK+MMS) durchgeführt wurde. Vorweg ist erkennbar, dass die Verschleißverläufe für alle Kühlungsmethoden sehr herkömmlichen Verlauf zeigen, d.h. initial mit steigender Tendenz und schließlich deutlich abflachen. Trotz der 6-fach höheren Strömungsmenge – 3600 ml/min gegenüber 600 ml/min (IK) – kann die Überflutungskühlung hinsichtlich der Verschleißentwicklung keine besseren Resultate gegenüber den anderen Kühlungsmethoden erzielen. Ein unerwünschter Effekt, der, unabhängig von der Kühlungsmethode bei allen PKD-Versuchen aufgetreten ist, ist die Werkstoffanhäufung auf der Spanfläche, welche in weiterer Folge auch eine Ursache für Ausbrüche entlang der Schneide gewesen ist (siehe Abbildung 7.14 bis 7.19). Diese Ausbrüche können auf verschiedene Gründe zurückzuführen sein, wie die angesprochene Aufbauschneidenbildung oder auch die entstehenden Spannungsspitzen an der Schneidkante aufgrund deren Scharfkantigkeit.

Die Bereiche entlang der Schneide, an denen es zu Ausbrüchen kam, waren unabhängig von der Kühlmethode und zumeist an der gleichen Stelle. Diese könnten auch darauf schließen lassen, dass es aufgrund der Sprödigkeit des Schneidstoffes und der Stauchung durch die mechanische Belastung bei der Zerspanung zu einem Abplatzen/Abbröckeln an der Schneidkante kam. Die besten Ergebnisse für die Wendeschneidplatte CCGW09T308-PDC-CU-S wurden mit der entwickelten Kühlmethode unter Verwendung der MMS-Sorte HD SE 1 erzielt. Die Verschleißmarkenbreite (VB_{max}) war nach einem Standweg l_f von 500 mm um etwa 20 μm geringer als jene mit Überflutungskühlung.

Die nächste Gegenüberstellung wird zwischen der Auswertung des Benchmark-Versuchs (*Abbildung 7.13*) und der Auswertung der Wendeschneidplatte CCGW09T304-PDC-CU-S (*Abbildung 7.20*) getroffen, welche sich nur hinsichtlich des Eckenradius unterscheiden. Auch in diesem Fall ist der Verschleißverlauf unauffällig, jedoch ist zu erkennen, dass die Verschleißentwicklung im Gegensatz zum Benchmark-Versuch nach 50 mm Standweg l_f weiterhin deutlich ansteigt. Die Ausbrüche zeigten sich auch bei dieser Wendeschneidplatte für alle Kühlmethoden. Aufgrund des geringeren Eckenradius sind die Ausbrüche entlang der Schneide näher zur Schneidenecke hin positioniert (siehe *Abbildung 7.21* bis *7.26*). Dies lässt sich generell damit erklären, dass sich der Großteil der Ausbrüche am Übergang vom Eckenradius zu Schneidkante gebildet hat, unabhängig vom jeweiligen Eckenradius. Anhand der Ergebnisse kann festgehalten werden, dass ein geringerer Eckenradius eine höhere Verschleißmarkenbreite (VB_{max}) zur Folge hatte. In diesem Fall liefert die Überflutungskühlung die besten Ergebnisse hinsichtlich der Verschleißentwicklung an der Freifläche. Dies lässt sich damit begründen, dass sich aufgrund des geringeren Eckenradius somit auch der Eingriffsbereich bzw. der Spanungsquerschnitt von der Lage/Positionierung des internen Kühlkanals in der Wendeschneidplatte entfernt.

Eine weitere Gegenüberstellung wird zwischen der Auswertung der Wendeschneidplattensorte CCGW09T308-PDC (*Abbildung 7.27*) und dem Benchmark-Versuch (*Abbildung 7.13*) durchgeführt. Der Unterschied dieser Wendeschneidplatte gegenüber jener aus dem Benchmark-Versuch liegt zum einen in ihrer Festigkeit und zum anderen in der PKD-Blankdicke (0,6 mm). Diese PKD-Sorte hat unter den vorhandenen Typen die geringste Festigkeit, nichtsdestotrotz sind die Verschleißergebnisse für diese PKD-Sorte besonders gut ausgefallen. Dies liegt daran, da der Kühlkanal bis 0,2 mm in das PKD-Blank erodiert wird, und somit in diesem Fall näher in Richtung der Spanfläche/Schneidkante/Schneidenecke positioniert ist. Dies bewirkt eine bessere Kühlwirkung, wodurch die überraschend guten Verschleißergebnisse erzielt worden sind. Die besten Verschleißergebnisse wurden wiederum mit der kombinierten Kühlung (IK+MMS) erreicht, welche um 50 Prozent weniger Verschleißmarkenbreite (VB_{max}) gegenüber der

Überflutungskühlung aufweist. Im direkten Vergleich der MMS-Sorten konnte hier der Typ FA 2 minimal bessere Ergebnisse liefern. Die Ausbrüche entlang der Schneide sind auch bei dieser Wendeschneidplattensorte unabhängig von der Kühlmethode aufgetreten (siehe *Abbildung 7.28* bis *7.33*).

Der letzte Vergleich der Versuchsauswertungen wird zwischen der Wendeschneidplattensorte CCGT09T308-PDC-S-CB2 (*Abbildung 7.34*) und dem Benchmark-Versuch (*Abbildung 7.13*) angestellt. Die Unterschiede zwischen den beiden PKD-Wendeschneidplatten liegen in der Festigkeit, der PKD-Blankdicke und der Schneidkantenausführung. Eine weitere Besonderheit der Wendeschneidplatte CCGT09T308-PDC-S-CB2 ist, dass sie mit Spanbrechergeometrie (positive Spangeometrie) ausgeführt ist. Diese PKD-Wendeschneidplatte konnte unter allen untersuchten PKD-Wendeschneidplatten die besten Verschleißergebnisse liefern, was nicht zuletzt auf die vorteilhaftere Schneidkantenengeometrie im Vergleich zu den übrigen PKD-Wendeschneidplatten zurückzuführen ist. Die innovative Kühlung (IK+MMS) mit der MMS-Sorte FA 2 ergibt für diese Erprobung die optimalste Zusammensetzung. Sie erzielt nach einem Standweg l_f von 500 mm eine Verschleißmarkenbreite (VB_{max}) von lediglich 21 μm und kann gegenüber der Überflutungskühlung einen um $2/3$ verringerten Freiflächenverschleiß aufweisen. Die hervorragenden Ergebnisse können zum einen auf die PKD-Blankdicke mit 0,6 mm zurückgeführt werden (siehe Erläuterung oben) und zum anderen auf die Festigkeit dieser PKD-Sorte, welche sich im mittleren Bereich befindet. Es gab bei der Versuchsdurchführung mit der Wendeschneidplatte CCGT09T308-PDC-S-CB2 nur beim Versuch mit der entwickelten Kühlmethode und der MMS-Sorte HD SE 1 einen Ausbruch entlang der Schneide (siehe *Abbildung 7.36*). Die Ursachen für die Ausbruchminimierung bei dieser Wendeschneidplatte dürften die Spanbrechergeometrie und die negativ gefaste Schneidkantenverrundung sein.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Auswertung der experimentell untersuchten PKD-Wendeschnidplatten haben gezeigt, dass die innovative Kühlmethode (IK+MMS) während des Zerspanungsprozesses für ausreichend Wärmeabfuhr aus der Kontaktzone sorgt. Sowohl die Temperatur als auch die Prozessstabilität sind über den festgelegten Standweg l_f stabil geblieben, es konnten keinerlei Diffusionsvorgänge beobachtet werden. Für bestimmte Ausführungen der PKD-Wendeschnidplatten konnten hervorragende Ergebnisse erzielt werden. Ebenfalls konnte die Anwendung der kombinierten Kühlmethode bei CBN-Wendeschnidplatten überzeugen und eine Verbesserung des Verschleißverhaltens aufzeigen. Um diese Kühlmethode für PKD-Wendeschnidplatten in der Serienfertigung nutzbar zu machen, sollten weitere Entwicklungen vorgenommen werden.

Die optimale Tiefe des Kühlkanals in Richtung der Spanfläche muss anhand experimenteller Untersuchungen detaillierter ermittelt werden. Es wurde festgestellt, dass mit immer kleiner werdendem Abstand zwischen der Spanfläche und dem Kühlkanal der Freiflächenverschleiß deutlich reduziert wurde. Zu beachten ist jedoch, dass mit immer kleiner werdendem Abstand die Festigkeit der Wendeschnidplatte abnimmt und es zu einer Verformung oder sogar zu einem Versagen der Wendeschnidplatte kommen kann.

Der Einsatz der MMS-Sorte HD SE 1 konnte gegenüber der MMS-Sorte FA 2 in den meisten Fällen die besseren Ergebnisse erzielen. Zudem konnte auch festgestellt werden, dass unter Verwendung von MMS HD SE 1 eine minimale Verbesserung der Verschleißerscheinungen an den Spanflächen erzielt wurde. Eine Weiterentwicklung der MMS-Sorte HD SE 1 könnte womöglich zu einer noch deutlicheren Verbesserung der Verschleißentwicklung an der Frei- und Spanfläche führen.

Da die Bearbeitung von Eisen-Kohlenstoff-Legierungen mit Diamantwerkzeugen nur bedingt möglich ist, gibt es seitens Werkzeugherstellern bis dato keine Empfehlungen für anwendbare Prozessparameter. Daher ist die Ermittlung der optimalen Prozessparameter notwendig und von größter Bedeutung. Die vorliegende Arbeit könnte hierzu weitere Erkenntnisse geliefert haben.

Die Ausbrüche entlang der Schneide, die nahezu bei allen PKD-Wendeschnidplatten aufgetreten sind, muss im Detail untersucht und eine Lösung zur Vermeidung der Ausbrüche erarbeitet werden. Die Ursachen bzw. ursächliche Mechanismen können zum einen die Aufbauschneidenbildung sein, zum anderen entstehende Spannungspitzen aufgrund der Scharfkantigkeit der Schneide. Hier wäre es ratsam, den Anschliff der Schneidkanten gezielt an die gegebene Werkstoffkombination anzupassen.

Aufgrund des vorherrschenden hohen Druckes im internen Kühlkreislauf der Wendeschneidplatte ist für die Befestigung und Abdichtung der Wendeschneidplatte am Drehhalter eine formschlüssige Lösung notwendig. Zudem sollte der interne Kühlkanal nicht erst nachträglich in die Wendeschneidplatte eingebracht werden müssen, sondern idealerweise bereits beim Sintervorgang im Grünling berücksichtigt werden.

9 Anhang – Maschinen und Geräte

Bearbeitungszentrum DMG Gildemeister CTX GAMMA 1250 TC	
Bezeichnung	5-Achs BAZ
Type	Glidemeister CTX GAMMA 1250 TC
Hersteller	DMG MORI
Arbeitsbereich	Umlaufdurchmesser, max.: 700 mm Drehdurchmesser, max.: 630 mm Senkrechtweg (Y): ± 200 mm Längsweg (Z): 1.300 mm
Ausbaustufe TC	Dreh-Frässpindel für Drehlänge 1.250 mm
Hauptspindel	Antriebsleistung: (100/40% ED) 25/34 kW Drehzahl, max.: 5.000 min ⁻¹
Dreh-Frässpindel	Antriebsleistung 13,2/22 kW (100/40% ED) Drehzahl, max.: 12.000 min ⁻¹ B-Achse mit Torque-Motor
Vorschubantrieb Eilgang X/Y/Z	40/40/30 m/min
Scheibenmagazin	36 Werkzeuge
CNC-Steuerung	Siemens SINUMERIK 840D
Maschinengewicht	18.500 kg
Anschlussleistung	110 kVA
Baujahr	2009

Tabelle 9.1: Bearbeitungszentrum DMG MORI Gildemeister CTX GAMMA 1250 TC



Abbildung 9.1: Bearbeitungszentrum DMG MORI Gildemeister CTX GAMMA 1250 TC [31]

Luftsprühinjektor HPM Breeze Z30	
Bezeichnung	Luftsprühinjektor
Type	Breeze Z30
Hersteller	HPM
Außenmaße (L x B x H)	250 mm x 600 mm x 1000 mm
Gewicht	55 kg (ohne Rahmen)
Spannungsversorgung/ Stromaufnahme	24 V DC/ 4A
Schutzart HPM Breeze E-Box	IP 56
Betriebstemperatur	+10°C bis +50°C
Trockene und gefilterte Luft	Filter kleiner 5 μm
Netzlufteingang	6 bis 16 bar
Luftverbrauch	Max. 2.900 NL/min
Flüssigkeitsverbrauch	5 bis 200 ml/h
Füllmenge	8 Liter
Aerosolqualität	homogenes Aerosol mit Größenverteilung von 0,1 – 1,5 μm

Tabelle 9.2: Luftsprühinjektor HPM Breeze Z30



Abbildung 9.2: Luftsprühinjektor HPM Breeze Z30

Senkerodiermaschine AGIE Agietron 2U	
Bezeichnung	Senkerodiermaschine
Type	Agietron 2U
Hersteller	AGIE
Außenmaße (L x B x H)	1.335 mm x 1450 mm x 2425 mm
Gewicht	2155 kg
Max. Werkstückabmessungen (L x B x H)	690 mm x 500 mm x 250 mm
Max. Werkstückgewicht	600 kg
Max. Elektrodengewicht	70 kg
Verfahrwege (X/Y/Z)	320/220/250 mm
Eilgang	720 mm/min
Anschlussleistung	8,1 kVA
Netzspannung	380 V
Benötigte Dielektrikummenge	415 L
Druckluftanschluss	7-8 bar

Tabelle 9.3: Senkerodiermaschine AGIE Agietron 2U



Abbildung 9.3: Senkerodiermaschine AGIE Agietron 2U

Digitalmikroskop Keyence VW-9000	
Bezeichnung	Digitalmikroskop
Type	VW-9000
Hersteller	Keyence
Messsystem	optisch
Kamera	max. Bildrate bei Video-Auflösung 4.000 fps 640 x 480 10.000 fps 640 x 192 15.000 fps 320 x 240 35.000 fps 256 x 128 230.000 fps 160 x 32
Max. Aufnahmepixel Standbilder	1920 x 1440
Kamera Farbauflösung	24 Bit
Technische Details	<ul style="list-style-type: none"> - duales System für High-Speed Videos und mikroskopische Anwendungen - Motorisierter Z-Vorschub ermöglicht Aufnahmen von 3D-Datensätzen - hoher Dynamikbereich HDR-Funktion (16-Bit-Farbabstufung) - 3D-Anzeige und Höhenvermessung mit Farbabstufung - Stativ mit freier Winkeleinstellung - automatische Bewegungserkennung

Tabelle 9.4: Digitalmikroskop Keyence VW-9000



Abbildung 9.4: Digitalmikroskop Keyence VW-9000 [32]

10 Literaturverzeichnis

- [1] DIN 8589, "Fertigungsverfahren Spanen," no. 0008, 2003.
- [2] F. Bleicher, *Spanende Fertigung und Umformtechnik*. TU Wien, 2013.
- [3] F. Klocke, *Fertigungsverfahren 1*. Springer-Verlag, 2018.
- [4] B. Kittl, *Grundlagen der Fertigungstechnik*. TU Wien, 2012.
- [5] "Zerspanen - Wikipedia." [Online]. Available: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5c/Winkel_in_der_Werkzeug-Orthogonalebene.png. [Accessed: 24-Jul-2018].
- [6] E. Westkämper and H.-J. Warnecke, *Einführung in die Fertigungstechnik*. Vieweg+Teubner Verlag, 2011.
- [7] E. Paucksch, S. Holsten, M. Linß, and F. Tikal, *Zerspantechnik: Prozesse, Werkzeuge, Technologien*. 2008.
- [8] H. Dürr, R. Pilz, S. Herrbach, and E. Seliga, *Grundlagen der Fertigungstechnik - 4 Trennen*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016.
- [9] B. Denkena and H. K. Tönshoff, *Spanen - Grundlagen*. Springer, 2011.
- [10] "Werkzeugverschleiß - Sandvik." [Online]. Available: https://www.sandvik.coromant.com/de-de/knowledge/milling/troubleshooting/tool_wear/pages/default.aspx. [Accessed: 24-Jul-2018].
- [11] H. Reichenbächer, "Trennen mineralischer Werkstoffe mit geometrisch bestimmten Schneiden," Universität Kassel, 2010.
- [12] H. Tanaka, M. Higuchi, T. Yamaguchi, O. Prefecture, and D. Corp, "Thermo-Chemical Wear Mechanism of Diamond Tool in Machining of Ferrous Metals," *CIRP Ann. - Manuf. Technol*, vol. vol.53, no. 2, pp. 57–60, 2004.
- [13] E. Abele, M. Kulok, and P. Anton, "Bearbeitung von Gusswerkstoffen mit Polykristallinen Schneidstoffen," *ZWF - Technologische Entwicklungen*, vol. 102. pp. 540–545, 2007.
- [14] M. Reiter, J. Brier, and F. Bleicher, "Machining of Iron-Carbon Alloys by the Use of Poly-Crystalline Diamond Cutting Inserts with Internal Cooling," *J. Manuf. Mater. Process.*, vol. 2, no. 3, p. 57, 2018.
- [15] A. H. Fritz and G. Schulze, *Fertigungstechnik*. Springer-Verlag, 2006.
- [16] Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV), "Minimalmengenschmierung in der spanenden Fertigung," *Information Minimalmengenschmierung in der spanenden Fertigung*, 2010.
- [17] A. Attanasio, M. Gelfi, C. Giardini, and C. Remino, "Minimal quantity lubrication in turning: Effect on tool wear," *Wear*, vol. 260, no. 3, pp. 333–338, 2006.

- [18] “Minimalmengeschmierung.” [Online]. Available: <http://www.zentralschmierung-mohr.com/technik/minimalmengeschmierung/>. [Accessed: 02-Aug-2018].
- [19] M. Volgger, *Lichtmikroskopie*, vol. 36, no. 3. Universität Wien, 2008.
- [20] B. Ilschner and R. F. Singer, *Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik*. Springer-Verlag, 2010.
- [21] C. P. Keferstein and M. Marxer, *Fertigungsmesstechnik*. Springer, 2015.
- [22] F. Bleicher and M. Reiter, “Wear reduction on cutting inserts by additional internal cooling of the cutting edge,” *Procedia Manuf.*, vol. 21, pp. 518–524, 2018.
- [23] F. Bleicher, C. Pollak, J. Brier, and A. Siller, “Reduction of built-up edge formation in machining Al- and cast iron hybrid components by internal cooling of cutting inserts,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 65, no. 1, pp. 97–100, 2016.
- [24] F. Bleicher, J. Brier, and A. Siller, “Simultaneous machining of a material combination with an internally and externally cooled cutting insert,” *Elvesier*, vol. vol.46, pp. 15–18, 2016.
- [25] “ISCAR Cutting Tools - Metal Working Tools - PCLCR/L-S-JHP.” [Online]. Available: <https://www.iscar.com/eCatalog/Family.aspx?fnum=3310&mapp=IS&app=20&GFSTYP=M&lang=IT>. [Accessed: 05-Sep-2018].
- [26] U. Gabbert, *Finite-Element-Methode Teil I*. Magdeburg: OTTO VON GUERICKE UNIVERSITÄT MAGDEBURG, 2012.
- [27] “Tooling Guide_TWZ2017.” [Online]. Available: https://www.jongen.de/out/Download/TWZ/ToolingGuide/ToolingGuide_TWZ2017_DE.pdf. [Accessed: 27-Mar-2019].
- [28] J. Michna, “Numerische und experimentelle Untersuchung zerspanungsbedingter Gefügewandlungen und Modellierung des thermo-mechanischen Lastkollektivs beim Bohren von 42CrMo4,” *Forschungsberichte aus dem wbk Inst. für Produktionstechnik*, vol. 179, p. 154, 2014.
- [29] “Fräswerkzeuge aus Hartmetall: Werkstoff Hartmetall.” [Online]. Available: http://www.gis-tec.com/deutsch/d_fraeser__i_hartmetall.htm. [Accessed: 28-Mar-2019].
- [30] J. Stampfl, *Werkstoffkunde metallischer Werkstoffe*. TU Wien, 2012.
- [31] “Dreh-Fräszentrum / CNC / universell / 5-Achs / Spindel - CTX gamma 1250 TC - DMG MORI.” [Online]. Available: <http://www.directindustry.de/prod/dmg-mori/product-5973-554524.html>. [Accessed: 26-Feb-2019].
- [32] “Keyence VW-9000.” [Online]. Available: <http://photos.labwrench.com/equipmentPhotos/10000/10272-7897.jpg>. [Accessed: 27-Feb-2019].

11 Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 2.1: Unterteilung der Bearbeitungsverfahren der Zerspanung mit geometrisch bestimmten Schneiden basierend auf DIN 8589-0 [1,2].....</i>	<i>2</i>
<i>Abbildung 2.2: Schneiden und Flächen am Schneidwerkzeug, in Anlehnung an [2] ...</i>	<i>3</i>
<i>Abbildung 2.3: Werkzeug-Bezugssystem (links) und Wirk-Bezugssystem (rechts), in Anlehnung an [3]</i>	<i>4</i>
<i>Abbildung 2.4: Darstellung weiterer Ebenen im Werkzeug-Bezugssystem, in Anlehnung an [3]</i>	<i>5</i>
<i>Abbildung 2.5: Winkel in der Werkzeug-Orthogonalebene, in Anlehnung an [5]</i>	<i>6</i>
<i>Abbildung 2.6: Kraft- und Geschwindigkeitskomponenten am Beispiel eines Drehmeißels, in Anlehnung an [3]</i>	<i>7</i>
<i>Abbildung 2.7: Zerspanungsgrößen am Beispiel eines Drehmeißels, in Anlehnung an [2]</i>	<i>9</i>
<i>Abbildung 2.8: Abhängigkeit der spezifischen Schnittkraft k_c von der Spanungsdicke h, in Anlehnung [4].....</i>	<i>10</i>
<i>Abbildung 2.9: Spanarten in Abhängigkeit von den Werkstoffeigenschaften, in Anlehnung [2,7]</i>	<i>13</i>
<i>Abbildung 2.10: Darstellung einer Aufbauschneide, in Anlehnung [2]</i>	<i>14</i>
<i>Abbildung 2.11: Spanformen und ihre Beurteilung nach der Spanraumzahl R [9].....</i>	<i>15</i>
<i>Abbildung 2.12: Freiflächenverschleiß; SF = Spanfläche, FF = Freifläche [10]</i>	<i>16</i>
<i>Abbildung 2.13: Kolkverschleiß [10].....</i>	<i>16</i>
<i>Abbildung 2.14: Kerbverschleiß [10]</i>	<i>17</i>
<i>Abbildung 2.15: Plastische Verformung [10]</i>	<i>17</i>
<i>Abbildung 2.16: Kammrisse [10]</i>	<i>17</i>
<i>Abbildung 2.17: Ausbrüche [10]</i>	<i>17</i>
<i>Abbildung 2.18: Einteilung der Schneidstoffe anhand der Verschleißfestigkeit und der Zähigkeit [9]</i>	<i>19</i>
<i>Abbildung 2.19: Einteilung der Schneidstoffe für die Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide [3]</i>	<i>20</i>
<i>Abbildung 2.20: Gefüge von polykristallinem Diamant; links: Mischkorn, rechts: konstante Korngröße [11].....</i>	<i>24</i>
<i>Abbildung 2.21: Temperaturabhängige Verschleißmechanismen im PKD-Schneidstoff (T_w = Werkzeugtemperatur) [13].....</i>	<i>25</i>
<i>Abbildung 2.22: Eigenschaften der Schneidstoffe im Vergleich [8,15].....</i>	<i>26</i>
<i>Abbildung 2.23: Prinzipielle Funktion einer Minimalmengenschmierung als Einkanalssystem und äußerer Zuführung, in Anlehnung an [18]</i>	<i>30</i>
<i>Abbildung 2.24: Aufbau eines Auflichtmikroskops [19]</i>	<i>32</i>
<i>Abbildung 2.25: Aufbau eines Fokusvariation-Mikroskops [21]</i>	<i>33</i>
<i>Abbildung 4.1: Werkzeughalter mit externer Kühlung und intern gekühlter Wendeschneidplatte, in Anlehnung an [24].....</i>	<i>36</i>

<i>Abbildung 4.2: Werkzeughalter der Fa. ISCAR vom Typ PCLCR/L 2020K-09S-JHP, Ausführung mit Sprühdüse [25]</i>	37
<i>Abbildung 4.3: Werkzeughalter - Version 1, mit interner Kühlung (IK) und MMS-Zuführung</i>	38
<i>Abbildung 4.4: Werkzeughalter - Version 2, mit interner Kühlung (IK) und MMS-Zuführung</i>	38
<i>Abbildung 4.5: Werkzeughalter - Version 3, mit interner Kühlung (IK) und MMS-Zuführung</i>	39
<i>Abbildung 4.6: Kühlkanal der WSP-Version 1</i>	40
<i>Abbildung 4.7: Kühlkanal der WSP-Version 2</i>	40
<i>Abbildung 4.8: Kühlkanal der WSP-Version 3</i>	41
<i>Abbildung 4.9: Kühlkanal der WSP-Version 4</i>	41
<i>Abbildung 4.10: Kühlkanal der WSP-Version 5</i>	41
<i>Abbildung 4.11: Kühlkanal der WSP-Version 6</i>	41
<i>Abbildung 4.12: Kühlkanal der WSP-Version 7</i>	42
<i>Abbildung 4.13: Konstruktive Darstellung des Kühlkanals im PKD-Blank</i>	43
<i>Abbildung 4.14: Schnittdarstellung (links); Drahtdarstellung des Kühlkanals unter einem Winkel von 11° zur Freifläche (rechts)</i>	43
<i>Abbildung 4.15: Übergang des Kühlkanals vom Werkzeughalter in die Wendeschneidplatte (WSP)</i>	44
<i>Abbildung 4.16: Darstellung der Anschlüsse für die Innenkühlung und der Sprühdüse für die Minimalmengenschmierung (MMS) am Drehhalter</i>	45
<i>Abbildung 5.1: Darstellung der verschiedenen Elementtypen, in Anlehnung [3]</i>	46
<i>Abbildung 5.2: Ablauf der FEM an einem Kragbalkenbeispiel, in Anlehnung an [26]</i>	47
<i>Abbildung 5.3: Abfuhr der umgewandelten Wärme am Werkzeug</i>	50
<i>Abbildung 5.4: Ergebnis der Vergleichsspannung an der finalen Version 2 - PKD 1 (0,6 mm)</i>	53
<i>Abbildung 5.5: Ergebnis der Vergleichsspannung an der finalen Version 2 - PKD 2 (1,4 mm)</i>	54
<i>Abbildung 5.6: Strömungssimulation ohne Kühlung</i>	57
<i>Abbildung 5.7: Strömungssimulation mit Überflutungskühlung</i>	57
<i>Abbildung 5.8: Strömungssimulation mit Innenkühlung</i>	58
<i>Abbildung 6.1: CBN-Wendeschneidplatte CCGW09T308-A-15EW</i>	60
<i>Abbildung 6.2: CBN-Wendeschneidplatte CCGW09T308-A-15S-2MC</i>	61
<i>Abbildung 6.3: CBN-Wendeschneidplatte CCGW09T308-D-15S-2MC</i>	62
<i>Abbildung 6.4: PKD-Wendeschneidplatte CCGW09T308-PDC-CU-S</i>	63
<i>Abbildung 6.5: PKD-Wendeschneidplatte CCGW09T304-PDC-CU-S</i>	64
<i>Abbildung 6.6: PKD-Wendeschneidplatte CCGW09T308-PDC</i>	65
<i>Abbildung 6.7: PKD-Wendeschneidplatte CCGT09T308-PDC-S-CB2</i>	66
<i>Abbildung 6.8: Senkerodierter Kühlkanal für die Innenkühlung der WSP</i>	69
<i>Abbildung 6.9: Erzeugung des Kühlkanals durch das Senkerodieren</i>	69

<i>Abbildung 6.10: Darstellung aller möglichen Anschlüsse am Drehhalter</i>	71
<i>Abbildung 6.11: Versuchsaufbau mit Überflutungskühlung</i>	71
<i>Abbildung 6.12: Versuchsaufbau nur mit Innenkühlung (IK)</i>	72
<i>Abbildung 6.13: Versuchsaufbau mit der Kombination aus interner Kühlung</i>	72
<i>Abbildung 6.14: Einstellungen am Bedienpult des MMS-Gerätes</i>	75
<i>Abbildung 7.1: Vermessung der maximalen Verschleißmarkenbreite (VB_{max})</i>	76
<i>Abbildung 7.2: Auswertung der Verschleißentwicklung für CCGW09T308-D-15S-2MC</i>	77
<i>Abbildung 7.3: Verschleißaufnahmen CCGW09T308-D-15S-2MC (Überflutungskühlung-1.Versuch)</i>	78
<i>Abbildung 7.4: Verschleißaufnahmen CCGW09T308-D-15S-2MC (Überflutungskühlung-2.Versuch)</i>	78
<i>Abbildung 7.5: Auswertung der Verschleißentwicklung für CCGW09T308-A-15EW</i>	79
<i>Abbildung 7.6: Verschleißaufnahmen CCGW09T308-A-15EW (IK)</i>	79
<i>Abbildung 7.7: Verschleißaufnahmen CCGW09T308-A-15EW (IK+MMS HD SE 1)</i>	80
<i>Abbildung 7.8: Verschleißaufnahmen CCGW09T308-A-15EW (IK+MMS FA 2)</i>	80
<i>Abbildung 7.9: Auswertung der Verschleißentwicklung für CCGW09T308-A-15S-2MC</i>	81
<i>Abbildung 7.10: Verschleißaufnahmen CCGW09T308-A-15S-2MC (IK)</i>	81
<i>Abbildung 7.11: Verschleißaufnahmen CCGW09T308-A-15S-2MC (IK+MMS HD SE 1)</i>	82
<i>Abbildung 7.12: Verschleißaufnahmen CCGW09T308-A-15S-2MC (IK+MMS FA 2)</i>	82
<i>Abbildung 7.13: Auswertung der Verschleißentwicklung für CCGW09T308-PDC-CU-S</i>	85
<i>Abbildung 7.14: Verschleißaufnahmen CCGW09T308-PDC-CU-S (IK)</i>	85
<i>Abbildung 7.15: Verschleißaufnahmen CCGW09T308-PDC-CU-S (IK+MMS HD SE 1)</i>	86
<i>Abbildung 7.16: Verschleißaufnahmen CCGW09T308-PDC-CU-S (IK+MMS FA 2)</i>	86
<i>Abbildung 7.17: Verschleißaufnahmen CCGW09T308-PDC-CU-S (Überflutungskühlung)</i>	87
<i>Abbildung 7.18: Entstehung eines Ausbruchs CCGW09T308-PDC-CU-S (IK+MMS HD SE 1)</i>	87
<i>Abbildung 7.19: Entstehung eines Ausbruchs CCGW09T308-PDC-CU-S (IK+MMS FA 2)</i>	88
<i>Abbildung 7.20: Auswertung der Verschleißentwicklung für CCGW09T304-PDC-CU-S</i>	88
<i>Abbildung 7.21: Verschleißaufnahmen CCGW09T304-PDC-CU-S (IK)</i>	89

<i>Abbildung 7.22: Verschleißaufnahmen CCGW09T304-PDC-CU-S (IK+MMS HD SE 1)</i>	89
<i>Abbildung 7.23: Verschleißaufnahmen CCGW09T304-PDC-CU-S (IK+MMS FA 2)</i>	90
<i>Abbildung 7.24: Entstehung eines Ausbruchs CCGW09T304-PDC-CU-S (IK)</i>	90
<i>Abbildung 7.25: Entstehung eines Ausbruchs CCGW09T304-PDC-CU-S (IK+MMS HD SE 1)</i>	91
<i>Abbildung 7.26: Entstehung eines Ausbruchs CCGW09T304-PDC-CU-S (IK+MMS FA 2)</i>	91
<i>Abbildung 7.27: Auswertung der Verschleißentwicklung für CCGW09T308-PDC</i>	92
<i>Abbildung 7.28: Verschleißaufnahmen CCGW09T308-PDC (IK)</i>	92
<i>Abbildung 7.29: Verschleißaufnahmen CCGW09T308-PDC (IK+MMS HD SE 1)</i> ...	93
<i>Abbildung 7.30: Verschleißaufnahmen CCGW09T308-PDC (IK+MMS FA 2)</i>	93
<i>Abbildung 7.31: Entstehung eines Ausbruchs Verschleißaufnahmen CCGW09T308-PDC (IK)</i>	94
<i>Abbildung 7.32: Entstehung eines Ausbruchs CCGW09T308-PDC (IK+MMS HD SE 1)</i>	94
<i>Abbildung 7.33: Entstehung eines Ausbruchs CCGW09T308-PDC (IK+MMS FA 2)</i>	95
<i>Abbildung 7.34: Auswertung der Verschleißentwicklung für CCGT09T308-PDC-S-CB2</i>	95
<i>Abbildung 7.35: Verschleißaufnahmen CCGT09T308-PDC-S-CB2 (IK)</i>	96
<i>Abbildung 7.36: Verschleißaufnahmen CCGT09T308-PDC-S-CB2 (IK+MMS HD SE 1)</i>	96
<i>Abbildung 7.37: Verschleißaufnahmen CCGT09T308-PDC-S-CB2 (IK+MMS FA 2)</i>	97
<i>Abbildung 9.1: Bearbeitungszentrum DMG MORI Gildemeister CTX GAMMA 1250 TC [31]</i>	102
<i>Abbildung 9.2: Luftsprühinjektor HPM Breeze Z30</i>	103
<i>Abbildung 9.3: Senkerodiermaschine AGIE Agietron 2U</i>	104
<i>Abbildung 9.4: Digitalmikroskop Keyence VW-9000 [32]</i>	105

12 Formelverzeichnis

<i>Formel 2.1: Spanungsquerschnitt A</i>	9
<i>Formel 2.2: Spannungsbreite b</i>	9
<i>Formel 2.3: Spannungstiefe h</i>	9
<i>Formel 2.4: Schnittkraft F_c</i>	9
<i>Formel 2.5: Spezifische Schnittkraft k_c</i>	10
<i>Formel 2.6: Spannungsdicken-Einfluss Neigung m</i>	10
<i>Formel 2.7: Korrekturfaktor für die Spannungsdicke h</i>	10
<i>Formel 2.8: Schnittkraft F_c</i>	10
<i>Formel 2.9: Schnittkraft F_c</i>	11
<i>Formel 2.10: Schnittleistung P_c</i>	11
<i>Formel 2.11: Spanraumzahl R</i>	14
<i>Formel 2.12: Wärmestrom \dot{Q}</i>	55

13 Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 5.1: Prozessparameter</i>	49
<i>Tabelle 5.2: Mittels Formel 2.2 und Formel 2.3 berechnete Werte für die Spannungsbreite b und die Spannungstiefe h</i>	49
<i>Tabelle 5.3: Angabe der Korrekturfaktoren, aus [2]</i>	49
<i>Tabelle 5.4: Bezugswert der spez. Schnittkraft und Werkstoffkonstante für den Werkstoff GGG-60 aus [27]</i>	49
<i>Tabelle 5.5: Analytisch berechnete Schnittkraft F_c</i>	49
<i>Tabelle 5.6: Analytisch berechnete Schnittleistung P_c</i>	50
<i>Tabelle 5.7: Werkstoff-Simulationsparameter Wolframkarbid (Hartmetall) [3,29]</i>	51
<i>Tabelle 5.8: Werkstoff-Simulationsparameter PKD [11,30]</i>	51
<i>Tabelle 5.9: Elementgrößen für die statisch-mechanische Simulation</i>	52
<i>Tabelle 5.10: Simulationsergebnisse für die Auswahl der Wendeschneidplattenausführung</i>	52
<i>Tabelle 5.11: Zu erwartende Ergebnisse der finalen Version 2</i>	54
<i>Tabelle 5.12: Elementgrößen für die Strömungssimulation</i>	55
<i>Tabelle 5.13: Daten für die Ermittlung der Simulationsdauer</i>	55
<i>Tabelle 5.14: Zeitliche Temperaturentwicklung der WSP mit interner Kühlung</i>	56
<i>Tabelle 6.1: CBN-Wendeschneidplatte CCGW09T308-A-15EW</i>	60
<i>Tabelle 6.2: CBN-Wendeschneidplatte CCGW09T308-A-15S-2MC</i>	61
<i>Tabelle 6.3: CBN-Wendeschneidplatte CCGW09T308-D-15S-2MC</i>	62
<i>Tabelle 6.4: PKD-Wendeschneidplatte CCGW09T308-PDC-CU-S</i>	63
<i>Tabelle 6.5: PKD-Wendeschneidplatte CCGW09T304-PDC-CU-S</i>	64
<i>Tabelle 6.6: PKD-Wendeschneidplatte CCGW09T308-PDC</i>	65
<i>Tabelle 6.7: PKD-Wendeschneidplatte CCGT09T308-PDC-S-CB2</i>	66
<i>Tabelle 6.8: Eigenschaften der MMS-Sorte Vascomill MMS FA 2</i>	67
<i>Tabelle 6.9: Eigenschaften der MMS-Sorte Vascomill HD SE 1</i>	67
<i>Tabelle 6.10: Eigenschaften und Betriebszustand des KSS Vasco 6000</i>	68
<i>Tabelle 6.11: Bearbeitungsparameter für das Senkerodieren des Kühlkanals</i>	68
<i>Tabelle 6.12: Prozessparameter der CBN-Wendeschneidplatten</i>	73
<i>Tabelle 6.13: Auflistung der CBN-Versuche</i>	74
<i>Tabelle 6.14: Prozessparameter der PKD-Wendeschneidplatten</i>	74
<i>Tabelle 6.15: Auflistung der PKD-Versuche</i>	75
<i>Tabelle 9.1: Bearbeitungszentrum DMG MORI Gildemeister CTX GAMMA 1250 TC</i>	102
<i>Tabelle 9.2: Luftsprühinjektor HPM Breeze Z30</i>	103
<i>Tabelle 9.3: Senkerodiermaschine AGIE Agietron 2U</i>	104
<i>Tabelle 9.4: Digitalmikroskop Keyence VW-9000</i>	105

14 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung/ Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
α	°	Freiwinkel
α	1/K	Wärmeausdehnungskoeffizient
α_C	1/K	Wärmeausdehnungskoeffizient für C
α_{Co}	1/K	Wärmeausdehnungskoeffizient für Co
β	°	Keilwinkel
γ	°	Spanwinkel
ε	-	Verformungsgrad
η	°	Wirkrichtungswinkel
κ	°	Einstellwinkel
λ	W/(m*K)	Wärmeleitfähigkeit
φ	°	Scherwinkel
A	mm ²	Spanungsquerschnitt
a_p	mm	Schnitttiefe
Al	-	chem. Elementsymbol für Aluminium
Al ₂ O ₃	-	chem. Elementsymbol für Aluminiumoxid
b	mm	Spanungsbreite
BAZ	-	Bearbeitungszentrum
bzw.	-	beziehungsweise
B ₂ O ₂	-	chem. Elementsymbol für Boroxid
C	-	chem. Elementsymbol für Kohlenstoff
Co	-	Cobalt
ca.	-	circa
CAD	-	Computer-Aided Design
CBN	-	kubisch kristallines Bornitrid
CNC	-	Computerized Numerical Control
d.h.	-	das heißt
DGL	-	Differentialgleichung
E	N/mm ²	Elastizitätsmodul
EDM	-	Electrical Discharge Machining
f	mm/U	Vorschub
F	N	Zerspankraft
FA	-	Fettalkohlbasis

F_a	N	Aktivkraft
Fa.	-	Firma
F_c	N	Schnittkraft
F_f	N	Vorschubkraft
F_p	N	Passivkraft
F_d	N	Drangkraft
FEM	-	Finite-Elemente-Methode
FF	-	Freifläche
GE	-	General Electric
h	mm	Spanungsdicke
HD	-	Heavy Duty
hex.	-	hexagonal
HM	-	Hartmetall
HSS	-	Hochleistungsschnellarbeitsstahl
IFT	-	Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik (TU Wien)
IK	-	Innenkühlung
k_c	N/mm ²	spezifische Schnittkraft
$k_{c1.1}$	N/mm ²	auf 1 mm ² bezogene spezifische Schnittkraft
K_h	mm	Korrekturwert für die Spanungsdicke h
K_γ	-	Korrekturwert für Spanwinkel
K_v	-	Korrekturwert für Schnittgeschwindigkeit
K_{sch}	-	Korrekturwert für Schneidstoff
K_{ver}	-	Korrekturwert für Verschleißzustand
kub.		kubisch
KL	-	Kolkklippenbreite
KM		Kolkmittenabstand
KSS	-	Kühlschmierstoff
KT	-	Kolktiefe
k- Ω -SST		Shear Stress Transport
LDS		Lichtbogendrahtgespritzt
l_f	mm	Standweg in Vorschub-Richtung
$m_c, \tan(\rho)$	-	Neigung der Geraden des Spanungsdicken-Einflusses auf die spezifische Schnittkraft
max.	-	maximal
MKD	-	monokristalliner Diamant
MMKS	-	Minimalmengenkühlschmierung

MMS	-	Minimalmengenschmierung
n	U/min	Drehzahl
NbC	-	Niobkarbid
NE	-	Nichteisen
PCD	-	polycrystalline diamond
PKD	-	polykristalliner Dimant
P_c	W	Schnittleistung
P_f	-	angenommene Arbeitsebene
P_{fe}	-	Arbeitsebene
P_n	-	Werkzeug-Schneidennormalebene
P_o	-	Werkzeug-Orthogonalebene
P_p	-	Werkzeug-Rückebene
P_{pe}	-	Wirk-Rückebene
P_r	-	Werkzeug-Bezugsebene
P_{re}	-	Wirk-Bezugsebene
P_s	-	Werkzeug-Schneidenebene
q	W/m ²	Wärmestromdichte
\dot{Q}	W	Wärmestrom
R	-	Spanraumzahl
SE	-	Esterlöbasis
Sek.	s	Sekunden
SF		Spanfläche
Si	-	chem. Elementsymbol für Silizium
spez.	-	spezifisch
T	°	Temperatur
Ti	-	chem. Elementsymbol für Titan
TaC	-	chem. Elementsymbol für Tantalkarbid
TiC		chem. Elementsymbol für Titankarbid
T_w	-	Werkzeugtemperatur
u.a.	-	unter anderem
v_c	m/min	Schnittgeschwindigkeit
v_e	m/min	Wirkgeschwindigkeit
v_f	m/min	Vorschubgeschwindigkeit
ν	-	Querdehnungszahl
VB	-	Verschleißmarkenbreite
VB_{max}	-	max. Verschleißmarkenbreite

vgl.	-	vergleiche
WC	-	chem. Elementsymbol für Wolframkarbid
z.B.	-	zum Beispiel