

1 Einleitung

Die Miniaturisierung ist durch Empfehlungen und gesetzliche Vorgaben nationaler Regierungen sowie der Europäischen Union (EU) zu einer weit verbreiteten Forderung in verschiedenen Industriezweigen geworden. Diese Vorgaben orientieren sich an den in den letzten Jahren veröffentlichten Kernzielen der Politik, wie der Verringerung der negativen Auswirkungen von Industrieprozessen auf den Klimawandel (Produktminimierung reduziert den spezifischen Energiebedarf der Produkte) sowie der Erhöhung der Anzahl intelligenter Systeme und Geräte in Städten und Fabriken (intelligente Systeme und Geräte erfordern Miniaturteile wie Mikroprozessoren und Mikroschaltungen). Infolgedessen hat die Nachfrage nach Miniaturkomponenten in vielen Bereichen der Industrie, wozu die Branchen wie Werkzeug- und Formenbau, Verfahrenstechnik, Medizintechnik, Luft- und Raumfahrttechnik, Automobilbauindustrie, Optik sowie Uhren- und Schmuckindustrie zählen, erheblich zugenommen [GLO11].

Zur direkten Herstellung von Miniaturkomponenten werden üblicherweise die Fertigungsverfahren Mikrosenkerosion, Laserablation und Mikrofräsen eingesetzt. Die Mikrosenkerosion ermöglicht es, hohe Aspektverhältnisse in leitenden Materialien, unabhängig von den mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs, mit hoher Prozesssicherheit herzustellen. Die Laserablation zeichnet sich dadurch aus, dass geringe Strukturgrößen bearbeitet werden können. Der Vorteil des Mikrofräsen liegt gegenüber den beiden anderen Fertigungsverfahren vor allem darin, dass eine höhere Materialabtragsrate, eine höhere Geometriefreiheit und eine bessere Oberflächenrauheit realisiert werden können. Im Vergleich zum Mikrosenkernodieren ergibt sich darüber hinaus durch die Einsparung der Zeit zur Herstellung der Elektrode eine Verkürzung der Prozesskette. Der Nachteil beim Mikrofräsen ist hingegen die geringere Prozesssicherheit, die auf die Werkzeugabdrängung sowie den daraus resultierenden Werkzeugverschleiß, die Gefahr des Werkzeugbruchs und das Auftreten von Gestaltabweichungen am Werkstück zurückzuführen sind. [BIE10]

Daneben wird das Mikrofräsen häufig zur indirekten Herstellung verschleißfester Formeinsätze aus gehärteten Warm- oder Kaltarbeitsstählen für das Spritzgießen oder die Massivumformung eingesetzt, mit denen anschließend Miniaturkomponenten hergestellt werden [SCH15]. Zur Sicherstellung einer kurzen Prozesskette und zur Einhaltung der Genauigkeitsanforderungen müssen die Formeinsätze im gehärteten Zustand bearbeitet werden. Dies stellt eine große Herausforderung dar, da die höheren Zerspankräfte, insbesondere bei Werkzeugen mit kleinen Nenndurchmessern und großer Freilänge, die Gefahr der Werkzeugabdrängung mit sich bringen [BIE10]. Bei der Erzeugung dreidimensionaler Konturen, wozu meist Vollhartmetall (VHM)-Mikroradiusfräsern zum Einsatz kommen, wird diese Herausforderung durch ständig wechselnde Eingriffssituationen und dem kugelförmigen Schneidkantenverlauf weiter verschärft. Aufgrund der überwiegenden Vorteile stellt das Mikrofräsen jedoch insgesamt ein geeignetes Fertigungsverfahren dar, bei dem jedoch noch weiteres Optimierungspotenzial besteht.

Die im Rahmen dieser Dissertation durchgeführten Forschungsarbeiten verfolgen das Ziel, die Werkzeugabdrängung beim Mikrofräsen von Freiformflächen durch Verringerung von Prozessinstabilitäten wirksam zu reduzieren. Zu diesem Zweck soll eine optimierte Geometrie für den Werkzeugauslauf und den Werkzeugkern des VHM-Mikroradiusfräser entwickelt und anschließend ein verbessertes Prozessverhalten mittels experimenteller Untersuchungen nachgewiesen werden.

2 Stand der Erkenntnisse

2.1 Grundlagen der Mikrozerspanung

Die Mikrozerspanung ist für die Herstellung mikrotechnischer Bauteile und Produkte von großer Bedeutung. Insbesondere eine hohe Geometriefreiheit, eine hohe Materialabtragsrate und eine gute Oberflächenrauheit zeichnen das Fertigungsverfahren gegenüber abformender und abtragender Fertigungsverfahren aus [BIE09]. Dies macht die Mikrozerspanung zu einem flexiblen, schnellen und zugleich wirtschaftlich attraktiven Fertigungsverfahren.

Der Zerspanprozess in der Mikrozerspanung lässt sich wie bei der konventionellen Zerspanung (Makrozerspanung) als geschlossenes System beschreiben, bei dem Eingangsoperatoren hinein- und Ausgangsoperatoren herausführen (vgl. Abbildung 1) [DEN11].

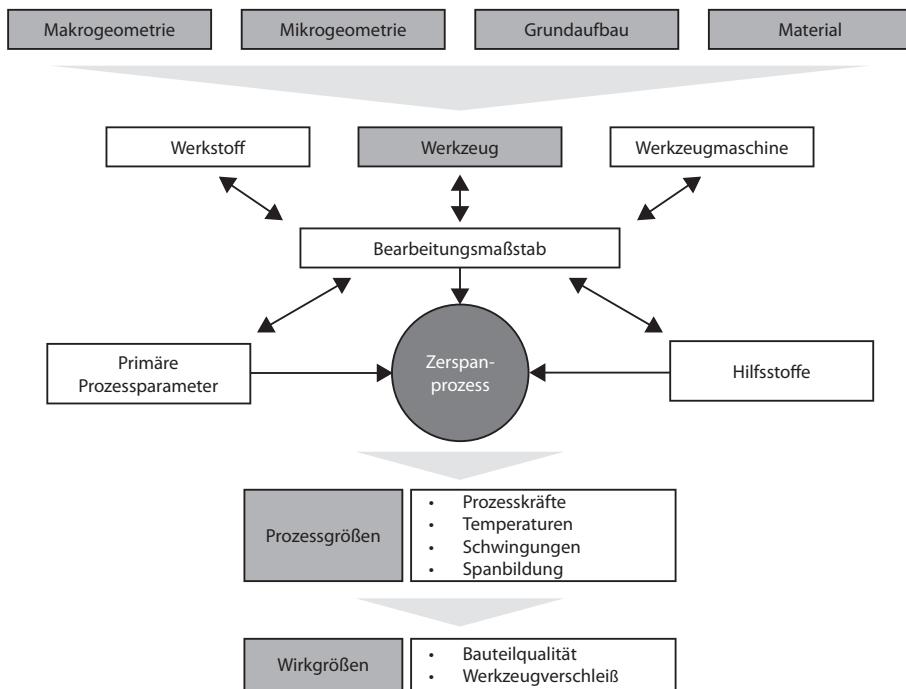


Abb. 1: Einflussfaktoren auf den Zerspanprozess [DEN11; KLO18]

Die System- und Stellgrößen beschreiben die Eingangsoperatoren. Die Systemgrößen legen die Bedingungen des Zerspanprozesses fest. Diese sind entweder unveränderlich oder über einen längeren Zeitraum hinweg konstant. Zu den Systemgrößen gehören die Werkzeugmaschine (z. B. Steifigkeit, Dämpfung, Temperaturgang, Genauigkeit), die Art des zu bearbeitenden Werkstoffs sowie dessen Eigenschaften und das Werkzeug. Letzteres wird über die Werkzeuggeometrie (Makro- und Mikrogeometrie), den Grundaufbau¹ sowie die mechanischen und thermischen

¹Der Grundaufbau beschreibt die Außengeometrie des Fräswerkzeugs. Diese beinhaltet den Werkzeugschaft sowie den Übergangs- und Schneidenbereich. In Unterabschnitt 2.3.2 erfolgt eine ausführliche Beschreibung dazu.

Eigenschaften des Materials bestimmt (z. B. Schneidstoff, Beschichtung). Die genannten Systemgrößen sind jeweils abhängig vom Bearbeitungsmakrostab (Makro-, Mikro- und Nanometer). Die Stellgrößen, bestehend aus den primären Prozessparametern (z. B. Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeit, Arbeitseingriff) und den Hilfsstoffen (z. B. Kühlschmierstrategie), werden in Abhängigkeit der Zerspanaufgaben festgelegt. Die Stellgrößen können während des Zerspanprozesses geändert werden.

Die Ausgangsoperatoren bestehen aus Prozess- und Wirkgrößen. Prozessgrößen, wozu beispielsweise Prozesskräfte, Schwingungen, Temperaturen oder auch die Spanbildung zählen, werden durch den Zerspanprozess verursacht und sind nur währenddessen erkennbar. Üblicherweise werden diese zur Diagnose oder Prozessüberwachung genutzt. Wirkgrößen hingegen können am Werkstück (z. B. Maß-, Form- und Lageabweichungen, Gratbildung, Randzonenbeeinflussung), am Werkzeug durch Verschleiferscheinungen, an der Werkzeugmaschine (z. B. Erwärmung, Verschleiß) und an den Hilfsstoffen (z. B. Erwärmung, Verunreinigung, chemische Veränderungen) bestimmt werden. [DEN11]

2.2 Mikrofräsen von Freiformflächen

Das Mikrofräsen ist ein spanendes Fertigungsverfahren und wird nach der Norm DIN 8580 der Hauptgruppe 3 „Trennen“ sowie der Untergruppe 3.2 „Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden“ zugeordnet [DIN22a]. Die Grenzen zwischen dem Makro- und Mikrofräsen sind fließend [HEI14]. Mikrotechnische Komponenten müssen nicht zwangsläufig kleine Abmessungen aufweisen. Es können ebenso verhältnismäßig große Bauteile mit mikrostrukturierten Oberflächen versehen werden. Eine Abgrenzung erfolgt meist nur über den Nenndurchmesser d_1 der verwendeten Werkzeuge. Gewöhnlich umfassen diese einen Bereich von $0,1 \text{ mm} \leq d_1 \leq 3 \text{ mm}$ [SCH15].

Innerhalb des MikrofräSENS ist das Formfräsen eines der am häufigsten eingesetzten Fräswerfahren [BOO22]. Damit lassen sich beliebige dreidimensionale Formen, sogenannte Freiformflächen, durch Steuerung der Vorschubbewegung herstellen [KNO00]. Der Einsatz einer Computerized Numerical Control (CNC)-Steuerung ermöglicht die gleichzeitige Bewegung mehrerer Achsen, wodurch komplexe dreidimensionale Formen erzeugt werden können. Das Formfräsen trägt innerhalb der Einteilung der Fräswerfahren nach der Norm DIN 8589 die Ordnungsnummer 3.2.3.6 [DIN03]. Die Herstellung von Freiformflächen erfolgt gewöhnlich durch das Schaftfräsen. Dieses beschreibt ein kontinuierliches Umfangs-Stirnfräsen unter Verwendung eines Schaftfräzers [KLO18].

2.2.1 Bearbeitungssituationen

Freiformflächen setzen sich nach KNOBEL im Wesentlichen aus Regelflächen (vor allem Trennflächen und Wandpartien), leicht gekrümmten großen Flächen sowie kritischen Hohlkehlen zusammen [KNO00]. Die Herstellung dieser erfolgt vornehmlich durch das 5-Achs-Simultanfräsen². Dieses bietet den Vorteil, dass durch das Schwenken des Fräskopfes schwer zugängliche Bereiche besser erreicht und sehr kleine Werkzeuge kürzer eingespannt werden können, was die Stabilität erhöht und die Oberflächenrauheit verbessert. Zusätzlich ermöglicht das 5-Achs-Simultanfräsen die Bearbeitung in einer Aufspannung, was zu einer höheren Genauigkeit und gleichzeitig reduzierten Durchlauf- und Rüstzeiten führt.

²Das 5-Achs-Simultanfräsen beschreibt eine Frästrategie, bei der sich alle fünf Achsen (drei Linearachsen, zwei Rundachsen) gleichzeitig bewegen.

Die Herstellung von Freiformflächen erfolgt meist in mehreren aufeinanderfolgenden Arbeitsschritten (vgl. Abbildung 2). Die Gestaltung der einzelnen Arbeitsschritte orientiert sich an der Komplexität, Größe und Beschaffenheit der Werkstückoberflächen sowie den geschwindigkeitsbestimmenden Wechselbeziehungen zwischen den einzelnen Arbeitsschritten [ALI22].

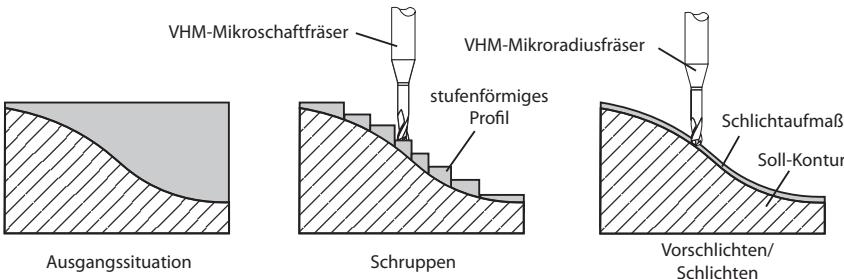


Abb. 2: Prozessablauf beim Mikrofräsen von Freiformflächen (eigene Darstellung, in Anlehnung an [REU01])

Während der Schrubbearbeitung wird zunächst mit größtmöglicher Zerspanleistung gearbeitet, bis ein vorgegebenes Restaufmaß für das Vorschlichen erreicht ist. Dabei entsteht häufig ein treppenförmiges Profil mit großen Aufmaßunterschieden zur Soll-Kontur. Durch das Vorschlichen soll dies eliminiert werden und ein konstantes Aufmaß zur späteren Endkontur entstehen. Dies schafft die Voraussetzung für eine optimale Schlichtbearbeitung. Diese hat die Aufgabe, die Endkontur zu approximieren und die geforderte Oberflächenrauheit herzustellen. [REU01] Die Kombination aus Werkzeugorientierung (Bohr-/Ziehschnitt) und Prozessstrategie (Gleich-/Gegenlauf) bilden die Frästrategie im Bearbeitungsprozess [REU01]. Bei der Bearbeitung von Freiformflächen führt die wechselnde Krümmung in der Werkzeugbahn zu ständig wechselnden Schnittbedingungen [HOC96]. Die optimale Frästrategie ist von der Lage der Oberflächen des Werkstücks zur Werkzeugspindelachse abhängig [ALI22]. Um den negativen Einfluss der geometrischen Änderung von Schnittbedingungen zu reduzieren, wird die Konturfläche in Bezug auf die Z-Richtung in Abhängigkeit des sich ergebenden Neigungswinkels der Flächen in Bereiche unterteilt. Bei Flächen < 45 Grad wird gewöhnlich der Fräsmodus „Konturparallel/-Spiralförmig“ eingesetzt, oberhalb von 45 Grad findet der Einsatz des „HöhenlinienfräSENS“ Verwendung [ALI22]. Der Grund hierfür ist die bessere Anpassung der Werkzeuggeometrie an die Bauteilkontur, die durch die Projektion des Bahnabstands in Bearbeitungsrichtung resultiert. Bei leicht gekrümmten Flächen wird der Fräsmodus „äquidistantes Schlüchten“ bevorzugt. Die Bearbeitung enger Kavitäten oder Innenradien zur Entfernung von Restmaterialanhäufungen verursacht eine hohe Umschlingung der Schneide, wodurch diese überhöhten mechanischen und thermischen Belastungen und damit Verschleiß ausgesetzt ist. Der Radius des Werkzeugs entspricht dabei meist dem kleinsten Krümmungsradius des zu bearbeitenden Bauteils [KNO00].

2.2.2 Spanbildung

Um das Prozessverhalten von Zerspanprozessen zu analysieren, ist das Verständnis für die Vorgänge bei der Spanbildung von grundlegender Bedeutung. Bei der spanenden Bearbeitung von homogenen Werkstoffen (z. B. Metallen) werden die drei Mechanismen pflug-, scher- und gemischt pflug-scher-dominant unterschieden. In der Makrozerspanung findet hauptsächlich ein Abscheren des Werkstoffs durch die Schneide statt (vgl. Abbildung 3, links). In diesem Fall

ist die Spanungsdicke h größer als die Mindestspanungsdicke h_{min} . Der Span kann vollständig erzeugt werden. Der Werkstoffabtrag findet plastisch statt.

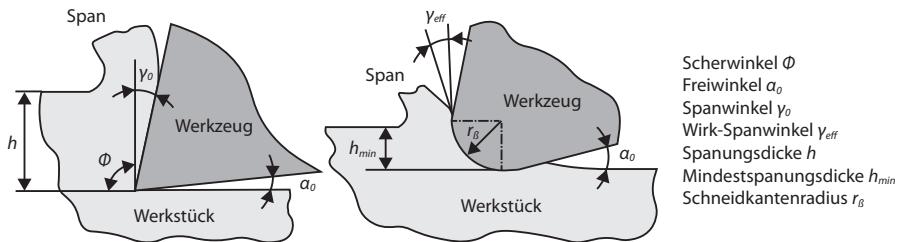


Abb. 3: Schematische Darstellung der Eingriffsverhältnisse in der Bezugsebene - links: Makrozerspanung, rechts: Mikrozerspanung (eigene Darstellung, in Anlehnung an [SCH06])

In der Mikrozerspanung hingegen wird der Mechanismus der Spanbildung durch den sogenannten Ploughing-Effekt dominiert. Der Grund dafür liegt im negativen effektiven Spanwinkel γ_{eff} des Werkzeugs, verursacht durch den im Vergleich zur Spanungsdicke h relativ hohen Schneidkantenradius r_β (vgl. Abbildung 3, rechts). Der negative effektive Spanwinkel γ_{eff} der Schneide komprimiert die Oberseite des Werkstoffs und verformt dieses plastisch. Im gemischt pflugscher-dominanten Bereich ist die Verformung elastisch-plastisch. Hierbei ist die Spanungsdicke h ungefähr gleich der Mindestspanungsdicke h_{min} .

- $h << h_{min}$ (pflug-dominant): Werkzeug drückt den Werkstoff unterhalb der Schneide durch und kehrt ohne Spanbildung zurück. In diesem Fall verformt sich der Werkstoff überwiegend elastisch und beschädigt die Oberflächenstruktur aufgrund der plastischen Verformung, was zu einer schlechteren Oberfläche führt.
- $h \approx h_{min}$ (gemischt pflug-scher-dominant): Span beginnt sich aufgrund der Scherwirkung in der primären Spanzone zu bilden. In diesem Fall ist die spezifische Passivkraft aufgrund des relativ starken Ploughing-Effektes hoch.
- $h >> h_{min}$ (scher-dominant): Durch die überwiegend plastische Verformung in der Scherzone wird ein kontinuierlicher Span gebildet. Der Anteil an elastisch verformten Werkstoff, der zurückfedert, ist im Vergleich zur plastischen Verformung gering.

Der letztgenannte Fall entspricht demnach am ehesten dem Mechanismus bei der Makrozerspanung von homogenen Werkstoffen. Bei der orthogonalen Bearbeitung ist die Spanungsdicke h nahezu konstant. Durch die Werkzeugumdrehung beim Fräsen findet ein unterbrochener Schnitt statt, was bedeutet, dass die Schneiden nicht dauerhaft im Eingriff sind, sondern während einer Umdrehung des Werkzeugs in den Werkstoff ein- und wieder austreten. Dabei ändert sich die Spanungsdicke h , sodass alle der vorgenannten Fälle auftreten können. Das Modell von XU wurde dahingehend für das Mikrofräsen formuliert und unterteilt die Spanentstehung in vier Phasen [XU96]. In Abbildung 4 sind die vier Phasen für den Fall des Gleichlauffrässens dargestellt.

In Phase I wird der Werkstoff im Bereich des Schneidkantenradius r_β des Werkzeugs getrennt. Bei maximaler Spanungsdicke h_{max} bildet sich ein kontinuierlicher Span. In Phase II wird die Mindestspanungsdicke h_{min} erreicht. Dabei wirken große Druck- und Reibungskräfte auf die

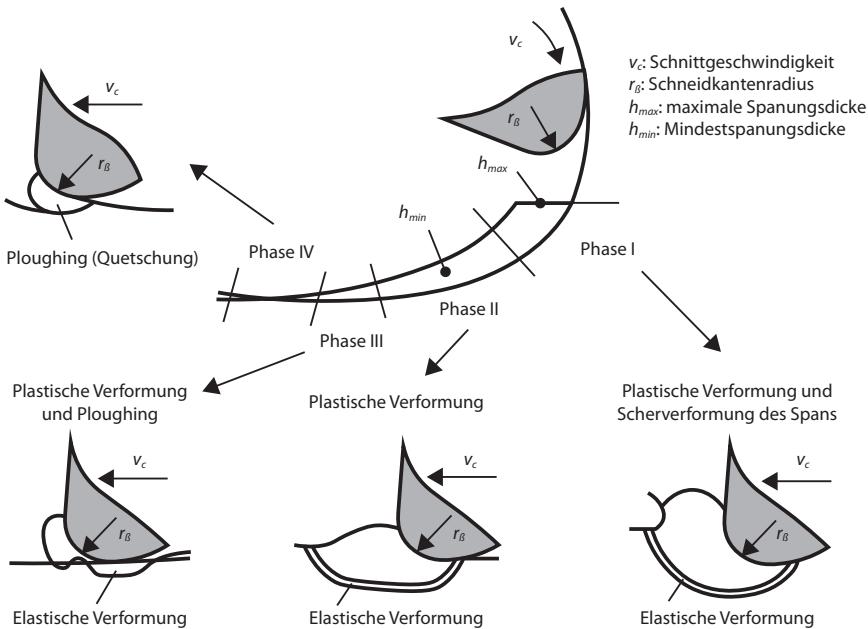


Abb. 4: Vier Phasen der Spanentstehung beim Mikrofräsen (eigene Darstellung, in Anlehnung an [XU96])

Hauptschneide. Der verformte Werkstoff wird durch den Schneidkantenradius r_β im Richtungssinn der Schnittgeschwindigkeit v_c nach vorne geschoben und dabei sowohl in die neu entstandene Oberfläche gepresst als auch plastisch verformt. Die plastischen Verformungen sind in der gesamten Wirkungszone deutlich größer als die elastischen Verformungen. In Phase III wird die Mindestspanungsdicke h_{min} unterschritten, wodurch der Werkstoff vor dem Schneidkantenradius r_β des Werkzeugs nach vorne gepflügt und der Werkstoff unter der Schneide überwiegend elastisch verformt wird. In Phase IV wird für den Fall des GleichlauffräSENS der verformte Werkstoff vor dem Schneidkantenradius r_β des Werkzeugs auf die vom vorherigen Schnitt erzeugte Oberfläche gequetscht, wodurch die kinematische Rauheit ansteigt. [HEI14]

Das Auftreten des Ploughing-Effekts bei der Mikrozerspanung ist neben dem Schneidkantenradius r_β und der Schnitttiefe a_p maßgeblich von der Mikrostruktur des Werkstoffs (Materialfehler, Dichte sowie Art, Lage, Orientierung und Größe von Körnern, Fasern und Partikeln) abhängig [LIU14]. Befindet sich das Mikroteilchen (Korn, Faser, Partikel) des Werkstoffes vollständig unter oder über der theoretischen Schnitttiefe, ist die Wirkung des Mikroteilchens vernachlässigbar. Befindet sich die Größe der Mikroteilchen im Bereich der theoretischen Schnitttiefe, so wird mehr Zerspanungsenergie benötigt. Dies führt zu stärkeren Vibrationen, schnellerem Werkzeugverschleiß, vermehrter Gratbildung und schlechteren Oberflächenrauheiten [BAL21]. Beim Mikrofräsen von gehärtetem Stahl hat sich zudem gezeigt, dass bei einem Verhältnis von Spanungsdicke h zu Schneidkantenradius r_β von etwa 1 der Größeneffekt zunimmt. Daher ist ein geringer Schneidkantenradius r_β eher geeignet, um den Größeneffekt und gleichzeitig die maximale Druckeigenspannung entlang der Eindringtiefe zu reduzieren [HEI22].