

# Sachbericht zum Verwendungsnachweis

## Verbundprojekt

Fräsprozessoptimierung durch Überlagerung der Schnittkräfte mit richtungsabhängigen und hochfrequenten Impulsen

„Impulsfräsen“

in der Fördermaßnahme

Produktionsforschung

## Autor

AVANTEC Zerspantechnik GmbH  
Uli Werthwein -Geschäftsführung-  
[uli.werthwein@avantec.de](mailto:uli.werthwein@avantec.de)

**Projektlaufzeit:** 01.07.2023 – 30.09.2025

**Erstellungsdatum:** 30.12.2025

## Projektpartner

AVANTEC Zerspantechnik GmbH // 02P22K560 // Einzelprojekt

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde durch das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Forschung, Technologie  
und Raumfahrt

BETREUT VOM



**PTKA**  
**Projektträger Karlsruhe**  
Karlsruher Institut für Technologie

## Inhaltsverzeichnis

I.	Projektbericht Impulsfräsen.....	3
I.1	Motivation und Aufgabenstellung .....	3
I.2	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens .....	4
I.3	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	7
I.4	Erzielte Ergebnisse .....	7
I.5	Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen .....	15
I.6	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse	15
I.7	Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes .....	15
I.8	Veröffentlichungen, Vorträge Referate, etc. ....	16

# I. Projektbericht Impulsfräsen

## I.1 Motivation und Aufgabenstellung

Der klassische Fräsprozess nach der DIN 8580 ist in der Hauptgruppe „Trennen“ die am häufigsten eingesetzte Technologie im industriellen Umfeld der Zerspanungstechnik mit definierter Schneidengeometrie. Es wurden daher in den letzten Jahren ein Vielzahl von Projekten durchgeführt, um die Wirtschaftlichkeit und den Energieeinsatz beim Fräsen zu optimieren. Neben der Verbesserung der Schneidwerkstoffe stand vor allem die Optimierung des organisatorischen und technischen Umfeldes des Fräsprozesses im Fokus der Arbeiten, da bei klassischen Bearbeitungszentren lediglich ca. 20% bis maximal 30% der eingesetzten Energie für den eigentlichen Zerspanungsvorgang eingesetzt werden.

Die bisherigen Arbeiten konzentrierten sich vor allem auf die Themen: Einsatz energieeffizienter Antriebe, Standbybetrieb, Optimierung Hydraulikaggregate, Optimierung Kühlstrategie, effizientes Energiemanagement, ... Die wesentlichen Projekte hierbei sind/waren (teilweise gefördert durch das BMBF) Energie MSP, Ewotek, NC Plus, Eco<sup>2</sup>-cut und Effizienzfabrik. Unter den Projektpartner finden sich führende Werkzeugmaschinenhersteller, universitäre Forschungseinrichtungen, namhafte Steuerungshersteller und Anwender.

Der geführte Informationsaustausch von AVANTEC mit führenden Steuerungsherstellern (FANUC und Siemens) sowie Anlagenherstellern (CHIRON, DMG-Mori, Kunzmann) hat ergeben, dass die in den oben genannten Projekten ermittelten Erkenntnisse bereits in weiten Teilen in die betriebliche Praxis einfließen. Speziell in den Vorfürzentren der Anlagenhersteller und bei Schulungen werden die Themen intensiv mit den Kunden besprochen und speziell geschult. Weiterhin werden die Vorgaben der DIN ISO 14955 (Teil 1-4) „Methods for measuring energy supplied to machine tools and machine tool components“ bei Neuanlagen berücksichtigt und umgesetzt.

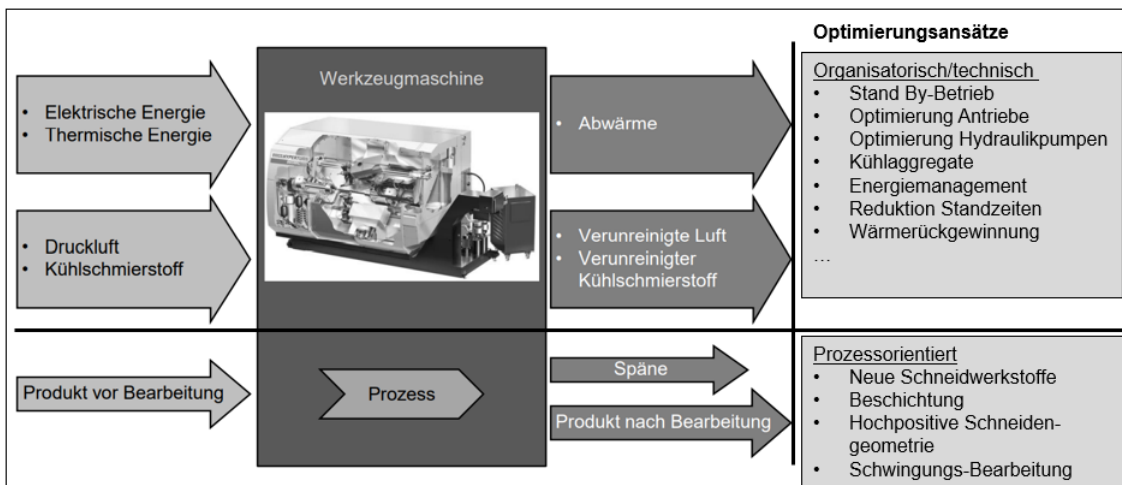


Bild 1: Einteilung der energetischen/wirtschaftlichen Optimierungspotentiale beim Fräsprozess

Technologisch anspruchsvoller sind im Gegensatz zu den organisatorisch/technischen Maßnahmen, die prozessorientierten Herausforderungen, die neben der Entwicklung neuer Schneidstoffe und Beschichtungsverfahren vor allem eine Verlängerung der Standzeit und die Reduktion des Energieeinsatzes zum Ziel haben.

Diese zentralen Verbesserungspotentiale können nur durch eine Optimierung des eigentlichen **Trenn- bzw. Zerspanungsprozesses erschlossen werden.**

Die übergeordnete Motivation und Aufgabenstellung des Vorhabens ist daher die Entwicklung, Herstellung und Vermarktung eines Verfahrens/Systems zur **prozessorientierten** Steigerung der Zerspanungsleistung und der Wirtschaftlichkeit bei Fräsprozessen.

Dies soll durch folgende Effekte/Maßnahmen erreicht werden:

- **Absenkung der Schnittkräfte bei reduziertem Energieeinsatz um bis zu 20%,**
- **Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit um bis zu 20%,**

- **Senkung der thermischen Belastung des Schneidstoffes in der Scherzone und der Spanabfuhrebene,**
- **Reduktion des Energieeinsatzes für den direkten Zerspanungsprozess.**

Diese Effekte sollen durch eine gerichtete und mehrdimensionale Überlagerung der Schnittkräftekräfte mit hochfrequenten, gerichteten Impulsen erreicht werden. Es wird davon ausgegangen, dass durch die überlagerten Kraftimpulse in der **Trenn-/Abscherzone die Binde- und Widerstandskräfte im Mikrobereich der Werkstoffstruktur deutlich reduziert werden können**. Das Phänomen ist zumindest teilweise aus dem Bereich von Borhämmern aus der Bauindustrie bekannt.

Weiterhin ist mit der Entwicklung die technische Optimierung der Schneidkantengeometrie verbunden, die auf die Belange einer hochfrequenten, periodischen Impulsbelastung bei einem **diskontinuierlichen** Schneideneingriff angepasst werden muss.

**Das System soll in der industriellen Serienfertigung bei hohen Zerspanungsvolumen eingesetzt werden und dadurch eine maximale Breitenwirkung erfahren (kein „Nischenprodukt“ für beispielsweise nur schwer zerspanbare Werkstoffe).**

Der Vertrieb soll über die eigene Vertriebsorganisation und zusätzlich auch über ausgewählte Hersteller von Werkzeugmaschinen (Lizenzvergabe) erfolgen.

## I.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Umfassende F&E-Anstrengungen von betrieblicher, wie auch wissenschaftlicher Seite haben in den letzten Jahren zu deutlichen Verbesserungen der Zerspanungsleistung im Bereich des Fräsens geführt. Bei den Arbeiten, die die Optimierung des Trennprozesses zum Ziel haben, bildet das bekannte „Model der Spanbildung“ eine wissenschaftliche Grundlage zum Gesamtverständnis (siehe Bild 2).

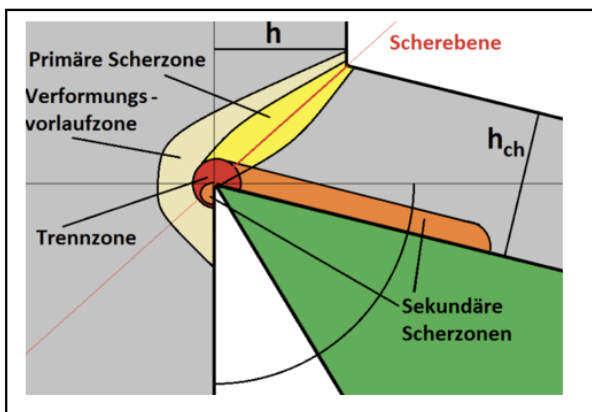


Bild 2: Prozess der Spanbildung

Stufe 1: Durch den Kontakt des Werkzeugs wird der zu bearbeitende Werkstoff an der Spanfläche der Schneide zusammengepresst und plastisch gestaucht (Trennzone).

Stufe 2: Der Schnittdruck bewirkt im Werkstoff Spannungen, die die innere **Zusammenhangs- und Widerstandskraft** des Werkstoffgefüges überwinden, so dass sich vor der Schneide ein **voreilender Riss** in Richtung des Schnittdrucks bildet (Verformungsvorlaufzone).

Stufe 3: Bei weiterer Werkzeugbewegung wird der gestauchte Span an der Spanfläche hochgeschoben und abgeschert (Scherebene).

Stufe 4: Die Späne trennen sich vom Werkstück und gleiten an der Spanfläche ab (sekundäre Scherzone).

Die **wissenschaftlichen Entwicklungen** (im Hause AVANTEC und auch in der Branche der Werkzeughersteller) haben sich in den **letzten Jahre** vor allem auch auf die Verbesserung der zur Verfügung stehenden Schneidstoffe (Feinkornhartmetalle, Titankarbide, Titanitrid, Wolframkarbide) und deren Beschichtung konzentriert. Die Entwicklung eines „optimalen“ Schneidwerkstoffes bewegt sich dabei immer im Spannungsfeld von erforderlicher Zähigkeit (möglichst kein Bruchversagen auch bei impulsartiger Belastung) und möglicher hoher

Schnittgeschwindigkeit und Verschleißfestigkeit bei hohem Warmverhalten. Die jeweiligen Grenzen werden durch die Werkstoffeigenschaften definiert.

Der Werkstoff „Hartmetall“ kann die gestellten Anforderungen am besten erfüllen und hat sich dabei als der „Basiswerkstoff“ für die breite industrielle Anwendung etabliert.

Die spezifischen Höchstanforderungen in beiden genannten Themenfelder (Verschleißfestigkeit <-> Zähigkeit) können jedoch nur unzureichend abgedeckt werden, da physikalische Grenzen ausgehend von den Werkstoffeigenschaften gegeben sind und auch bei weiterer Perfektionierung der Werkstoffe und Oberflächen, nicht überwunden werden können.

Um die Leistung und Prozessstabilität weiter zu verbessern, wurden/werden weiterhin Entwicklungen zur Reduktion von Störeinflüssen, wie z.B. unerwünschten Schwingungen/Resonanzen betrieben. **Ebenso jedoch auch die Entwicklungen von ultraschallunterstützten Zerspanungsverfahren.** Das ultraschallunterstützte Zerspanen wird im Schwerpunkt bei extrem schwer zu zerspanenden Werkstoffen (Titan, Edelmetalle wie CrNi, CrCo, CrMo, Hochleistungskeramik, Hartmetall, Wolfram, Germanium, Glas) oder auch in der Mikrozerspanung eingesetzt. Neben dem Einsatz beim Schleifen existieren auch vereinzelt Anwendungen beim Fräsen.

Bei genauer Definition zählt die ultraschallgestützte Fräsbearbeitung nach DIN 8589 zu den Schleifverfahren, also dem Spanen mit **geometrisch unbestimmter Schneide**. Bei der Anwendung wird die traditionelle Werkzeugrotation mit einer Oszillation in axialer Werkzeugrichtung kinematisch überlagert. Im Gegensatz zum konventionellen Fräsen stellt bei diesem Verfahren nicht die Werkzeugrotation, sondern die Ultraschallschwingung den Haupttrennmechanismus dar. Die Schwingungen liegen je nach Anwendung im Frequenzbereich von 20 - 45 kHz und einer Amplitude von 1-10 µm. Eine Analyse des Standes der Technik zeigt, dass in der Vergangenheit etliche universitäre Forschungsarbeiten im relevanten Themenfeld durchgeführt wurden. Ausgehend von diesen Entwicklungen haben sich zumindest teilweise Produkte entwickelt, die von Firmen angeboten werden. Die wesentlichen Entwicklungen sind im Folgenden genannt.

#### Am Markt verfügbare Anlagenkonzepte

Momentan werden von der Firma DMG MORI die Anlage „ULTRASONIC 3rd Generation und von der Firma Tongtai das Maschinenkonzept „TONGTAI VU-5“ am Markt angeboten. Die Anlage von DMG MORI entspricht dabei der Basisentwicklung von Fa. Sauer aus Stipshausen, welche von DMG MORI übernommen wurde. DMG MORI sieht sich als Marktführer in der US-gestützten Zerspanung. Beide Maschinenkonzepte arbeiten mit einer hochfrequenten (bis 45 kHz) Schwingungsüberlagerung des Zerspanprozesses (Schleifen) und einer **eindimensionalen Längswelle (longitudinal)**, die durch einen Generator auf Basis von Piezo-Technologie erzeugt wird (siehe Bildmaterial im Anhang).

#### Wesentliche wissenschaftlich/universitäre Entwicklungen

*Fraunhofer IWU/Chemnitz:* Im Rahmenprogramm „Zwanzig20-Partnerschaft für Innovation“ wurde die Entwicklung eines Schwingensystems (PermaVib) durch das BMBF gefördert. Die Entwicklung wurde im Schwerpunkt am FhG-Institut IWU in Chemnitz durchgeführt. Das System beruht auf einem Schwingensystem welches mit **longitudinalen Wellen** bei ca. 15-18 kHz arbeitet und für Bohrer und Stirnfräser eingesetzt werden kann. Das System ist vergleichbar mit den Systementwicklungen von DMG MORI //TONGTAI.

*Fraunhofer-Institut IPT:* Das IPT (Dresden) beschäftigt sich bereits seit längerem mit ultraschallgestützten Produktionsprozessen (Schneiden von Lebensmitteln, US-Schweißen, Mikrodrehprozesse). In einem geförderten Projekt (BMW // IGF-Vorhaben // AIF// Nr. 17112N) wurde eine Auslegungsmethode für Komponenten der US-gestützten Zerspanung entwickelt, mit der rechnergestützt die Amplitude, Frequenz und die Energie des Generators ermittelt werden kann.

*TU München (Prof. Dr. Zäh) // TH-Deggendorf (Prof. Dr. Fütterer):* Die beiden Institute arbeiten im Rahmen eines durch die DFG geförderten Projektes (Nr. 406283248) am Thema „Zerspanung von Hochleistungswerkstoffen mit ultrasonisch modulierter Schnittgeschwindigkeit. Der Schwerpunkt liegt auf der Zerspanung von Ti-6Al-4V und hartspröden Werkstoffen. Als Bearbeitungszentrum wird eine Anlage der Fa. DMG MORI eingesetzt.

*wbk // KIT-Karlsruhe // Prof. Dr. Schulze:* Am wbk wurden/werden Versuche zur Zerspanungsoptimierung unterschiedlichster Materialien durchgeführt. Interessant dabei ist vor allem die Dissertation von Dr. Becke (2011), der sich mit der prozesskraftrichtungsangepassten Frässtrategie zur schädigungsarmen

Bohrungsbearbeitung an faserverbundverstärkten Kunststoffteilen beschäftigt hat. In der Arbeit werden Strategien zur Reduktion von Prozesskräften speziell bei Faserverbundwerkstoffen entwickelt.

*Bekannte Patentanmeldungen (durchgeführte Patentrecherche):* Zum ultraschallunterstützten Zerspanen wurde eine umfassende Patenanalyse durchgeführt. Es existieren eine Vielzahl von Patentanmeldungen; es könnten jedoch keine Anmeldungen gefunden werden, die den geplanten Entwicklungsinhalt beschreiben würde.

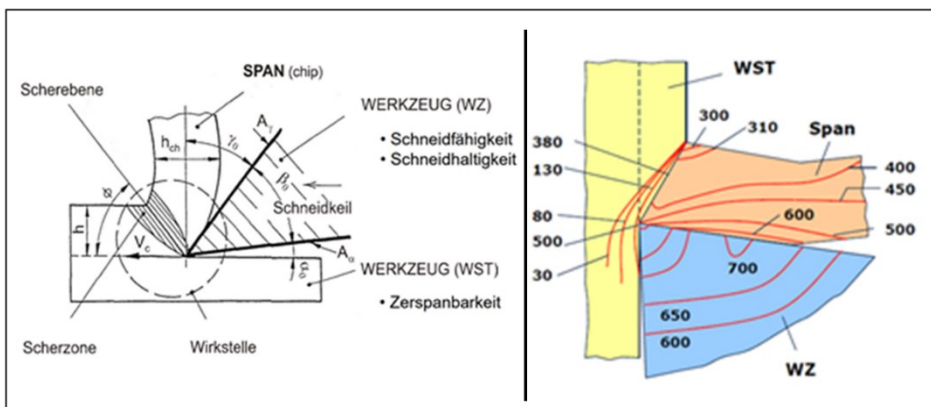
## Bisherige Arbeiten des Antragstellers

AVANTEC als Antragsteller, entwickelt, produziert und vertreibt am Standort Illingen (Enzkreis) mit 88 Mitarbeitern Hochleistungsfräswerkzeuge auf Hartmetallbasis und versteht sich als der Pionier bei der Entwicklung und Vermarktung von Fräswerkzeugen mit **hochpositiv ausgeführten Spanwinkeln**.

Im Produktprogramm befinden sich nahezu alle Fräsertypen, die in der industriellen Zerspanung im Hochleistungsbereich eingesetzt werden (siehe Bild 3). Bei den folgenden Ausführungen wird davon ausgegangen, dass das Grundwissen zum Zerspanen mit geometrisch bestimmter Schneide (DIN 8559 // DIN 6580 -6584 // ISO 3002 // DIN ISO 3685) hinreichend bekannt ist.

Werkzeuge der neuesten Generation weisen Spanwinkel für duktile Werkstoffe von  $> 20^\circ$  und von  $> 10^\circ$  für spröde Werkstoffe auf. Mit dieser Gestaltung wird der Zerspanungsprozess in mehrfacher Hinsicht positiv beeinflusst. Durch die Vergrößerung des Spanwinkels (vergl. Bild 4), nimmt der Keilwinkel ab, wodurch sich die Zerspanungskräfte und damit der Energieeinsatz der Zerspanung reduzieren lassen. Ebenso wird die Wärmeentstehung reduziert, da die Scherarbeit in der Trennzone und die Reibung bei der Späneabfuhr zwischen Span und der Spanfläche des Schneidwerkstoffes reduziert wird. Bedingt dadurch reduziert sich die Wärmeinbringung in die Scherfläche (siehe Bild 4), da diese direkt proportional zum Spanwinkel ist. Dadurch sinken wiederum der Verschleiß und die Standzeit kann verbessert werden.

Die Zerspanungsleistung kann (in definierten Grenzbereichen) pro  $5^\circ$  Winkelveränderung des Spanwinkels um ca. 20 % erhöht werden (Verbesserung der Zerspanungsleistung von  $35 \text{ cm}^3/\text{KW}$  auf  $42 \text{ cm}^3/\text{KW}$ ). Die Angaben beziehen sich auf den Schneidstoff HM bei der Zerspanung des Werkstoffes GGG 60.



Den Vorteilen von hochpositiven Werkzeugen sind jedoch Grenzen gesetzt, da die Bruchgefahr mit abnehmendem Schneidwinkel deutlich wächst.

Aus diesem Grunde wurde von AVANTEC ein Forschungsvorhaben durchgeführt, welches die Ermittlung des tatsächlichen Verschleißzustandes eines Fräasers ermitteln kann und dadurch frühzeitig Maßnahmen gegen einen drohenden Werkzeugbruch eingeleitet werden können. Das Projekt wurde vom Projektträger PTKA aus Karlsruhe begleitet und vom BMBF finanziell unterstützt (Förderkennzeichen: 02P19K00 // Verschleißdiagnose an Fräswerkzeugen auf Basis eines werkzeugspezifischen genetischen Fingerabdruckes (Verschleißdiagnose). In diesem Projekte konnten sehr wertvolle Erkenntnisse ermittelt werden, die als Grundlage für das beantragte Projekte herangezogen werden können.

Die durchgeführten Arbeiten werden umfassend im Kapitel I.4 beschrieben.

### I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der ursprünglich definierte Zeitraum wurde um drei Monate verlängert, da neben der Impulserzeugung durch Piezotechnologie eine weitere Variante (deutlich kostengünstiger), auf Basis eines rein elektromechanischen Funktionsprinzips zusätzlich entwickelt, getestet und wissenschaftlich bewertet wurde.

Die erzielten Ergebnisse erfüllen die gestellten Erwartungen. Als Endergebnis des Projektes war eine Entwicklung angestrebt, bei der die Impulserregung über ein Zwischenmodul realisiert werden sollte, welches zwischen Fräseraufnahme und einer standardisierten Schnittstelle zur Fräsmaschine angeordnet wird. Die im laufenden Projekt gewonnene Erkenntnis, dass eine horizontal eingebrachte Impulserregung deutliche Vorteile gegenüber der ursprünglich geplanten Variante der vertikalen Impulseinbringung erwarten lässt, erfordert zusätzliche Versuche um die bisherigen Ergebnisse wissenschaftlich abzusichern.

Dazu ist geplant, die Impulserregung von der angedachten „Spindellösung“ in die Aufnahmevorrichtung der Werkstücke („Spanneinrichtung“) zu verlegen und die Impulserregung ausschließlich in horizontaler Richtung einzuleiten. Hierzu sind Versuche mit der Anregung durch Piezotechnologie (ein-/ zweidimensional -> horizontale Ausrichtung) sowie mit einem rein mechanischen Antrieb (Elektromotor mit Polygonwelle) zum direkten Vergleich geplant. Die im Arbeitsplan im Vorfeld definierten Arbeitsschwerpunkte erwiesen sich als schlüssig und wurden entsprechend abgearbeitet.

---

Hierbei ist speziell auf die realisierten Teilsysteme zur:

- Impulserzeugungssystem mittels Piezotechnologie,
- Impulserzeugungssystem mittels elektromechanischem Prinzip,
- Messsystem zur Amplitudenmessung mittels Lasertriangulation,
- Messsystem zur Bestimmung der Prozesskräfte auf Basis von Piezotechnologie,
- Messsystem zur Bestimmung der Prozesskräfte auf Basis von DMS,
- Spannsystem für Versuchsdurchführung,

sowie der sehr umfangreichen Software zur Messdatenaufbereitung und Visualisierung hinzuweisen.

Der vorab kalkulierte Kostenrahmen konnte eingehalten werden. Dies ist vor allem der großzügigen (und teilweise kostenneutralen) Unterstützung der assoziierten Partner zu verdanken. Besonders zu erwähnen sind dabei die Firmen Kyence, sonniKKS, Kistler und das Steinbeiszentrum an der Hochschule Pforzheim.

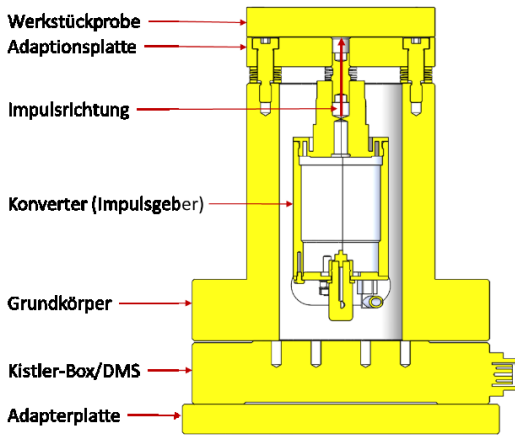
### I.4 Erzielte Ergebnisse

Nach einer eingehenden Markt- und Patenanalyse wurden unmittelbar die relevanten Teilsysteme umgesetzt und die für die Versuchsdurchführung Prozessparameter und Versuchswerkzeuge festgelegt.

Es wurden im Projektverlauf sehr umfangreiche Fräsversuche mit unterschiedlichen Fräsergeometrien und unterschiedlichen Materialien durchgeführt. Dabei wurden mehrdimensionale, gerichtete, hochfrequente Impulse in den Zerspanungsprozess eingeleitet und die resultierenden Kräfte gemessen, aufgezeichnet und analysiert.

Das **System A zur Impulserzeugung** basiert auf der Piezotechnologie (Zusammenarbeit mit Fa. soniKKS). Die Impulse können mit unterschiedlichen Leistungen und Frequenzen in beliebiger Kombination der Hauptrichtungen (X,Y,Z) auf das zu zerspanende Teil eingeleitet werden.

Die sich ergebende resultierende Impulsebene/Impulsrichtung sowie die sich einstellende Amplitude wird messtechnisch mittels Lasertriangulation ermittelt.



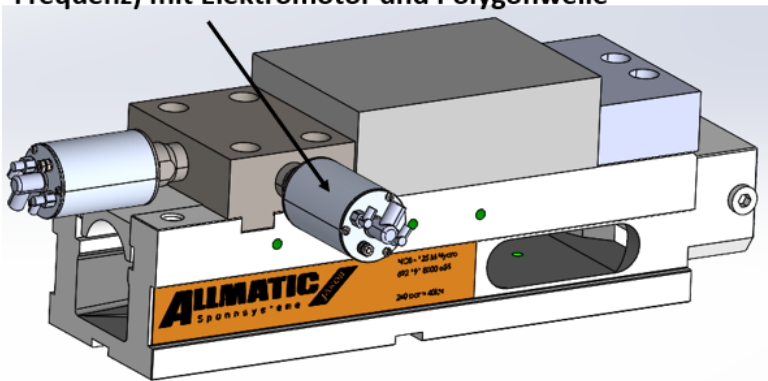
*Bild 5: Mechanischer Aufbau der Grundeinheit zur Aufnahme der Konverter.*



*Bild 6: Beispielhaft erzeugtes Schwingungsmuster bei Anregung in Z-Richtung // Komponenten soniKkS*

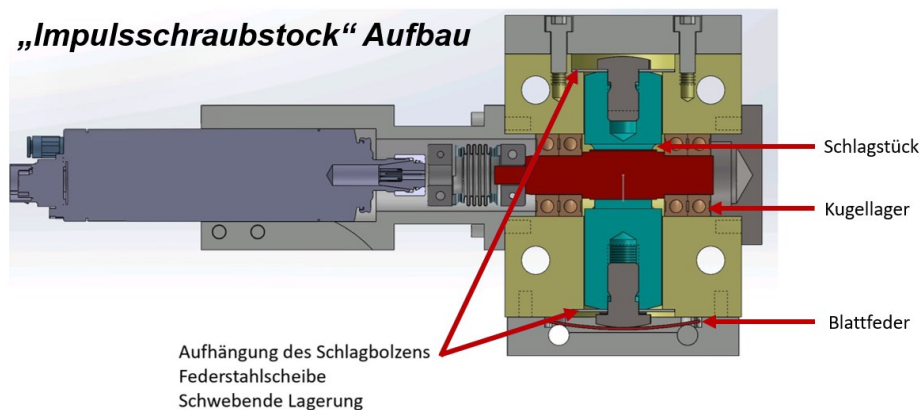
Das **System B zur Impulserregung** basiert auf einem mechanischen Prinzip. Dabei treibt ein Elektromotor eine Excenterwelle an, die wiederum auf ein Schlagwerk wirkt und somit mit hoher Frequenz eine Impulsbelastung auf das zu zerspanende Werkstück aufbringen kann. Die mechanische Impulserzeugung wird mit einer Spanneinrichtung der Fa. ALLMATIC kombiniert, so dass die zu zerspanenden Werkstücke direkt eingespannt werden können. In den folgenden Bildern ist der mechanische Aufbau ersichtlich.

**Impulsanregung alternativ (eindimensional; geringere Frequenz) mit Elektromotor und Polygonwelle**



*Bild 7: Aufbau zur Einleitung der Impulskräfte in rein horizontaler Ausrichtung*

### „Impulsschraubstock“ Aufbau



**Bild 8:** Aufbau des mechanischen Schlagwerkes

Die beim Zerspanungsprozess resultierenden Prozesskräfte müssen messtechnisch erfasst, ausgewertet und visualisiert werden. Das Spannsystem mit den beiden möglichen integrierten Impulserzeugungsvarianten wurde daher so konzipiert, dass diese direkt mit den entwickelten Messsystemen gekoppelt werden kann.

### „Impulsschraubstock“ (mechanisch) mit Kraftmessung



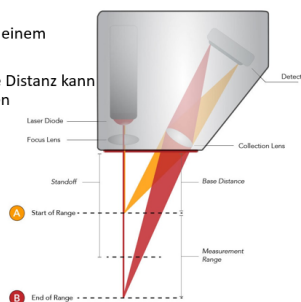
**Bild 9:** Aufbau des mechanischen Versuchsträger in Kombination mit dem DMS-Messsystem

### System zur Ermittlung und Vektorisierung der eingebrachten Impulse (Impulsrichtung, Amplitude)

Um qualifizierte Versuche durchführen zu können, muss die resultierende Wirkrichtung der Impulsebenen sowie die „Amplitude“ der sich einstellenden Impulsebene bei gegebener (eingestellter) Frequenz ermittelt werden. Die messtechnische Realisierung erfolgt mit einem Lasertriangulationssystem der Fa. Keyence (LK-G5000). Der Sensorkopf wird beim Messen mittels einer SK-Aufnahme direkt an der Frässpindel aufgenommen. Die Messung erfolgt am Werkstück in den drei Hauptachsen. Die Ergebnisse werden pro Hauptachse ausgewertet (Filterung über Hochpassfilter) und dann der resultierende Vektor (nach Richtung und Länge (Amplitude)) berechnet.



- Lasertriangulation bedeutet Abstandsmessung durch Winkelberechnung
- Ein Sensor projiziert einen Laserpunkt auf das Messobjekt
- Der Laserpunkt wird auf dem Objekt je nach Entfernung unter einem bestimmten Winkel auf das Empfangselement reflektiert
- Sowohl durch die Position des Laserpunktes als auch durch die Distanz kann der Abstand zwischen Messobjekt und Sender ermittelt werden
- Spezifikationen System Lasertriangulation Keyence LK-G5000
  - Gespeicherte Datenmenge: 50000 Punkte
  - Abtastrate: 20  $\mu$ s
  - Messfrequenz: 50kHz
  - Messungsdauer: 1 Sekunde
  - Auflösung: 0,1  $\mu$ m



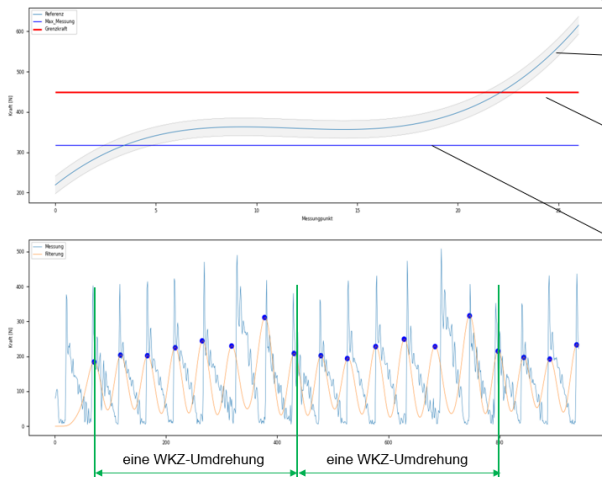
**Bild 10:** Lasersensor und Messprinzip

Die Bestimmung der Impulsrichtung sowie der Amplitude als Funktion der Impulseinbringungsrichtungen (X,Y,Z) sowie der jeweils anliegenden Leistung und der jeweiligen Frequenz wird durch eine vektorielle Addition der einzelnen gemessenen Impulsamplituden vorgenommen.

Bei der Messung der Prozesskräfte wird auf Erfahrungswerte und Ergebnisse des abgelaufenen KMU-Innovativ Projektes „Verschleißdiagnose“ zurückgegriffen. Zur Aufnahme der relevanten Prozesskräfte wurde eine Messeinrichtung auf Basis von DMS-Technologie sowie auf Piezotechnologie weiterentwickelt und für die spezifischen Anforderungen des Impulsfräsens angepasst.

Die Auswertung der Messsignale erfolgt durch eine Messsoftware, auf der Basis eines Python-Skriptes. Beim direkten Vergleich von Messwerten (mit und ohne Impulsbelastung) ist sicherzustellen, dass die Versuche jeweils mit vergleichbaren und reproduzierbaren Rahmenbedingungen durchgeführt werden. Dies ist speziell auch in bezug auf den Verschleißgrad der Wendeschneidplatten (WSP) zu berücksichtigen. Das entwickelte Messverfahren basiert auf dem „genetischen Fingerabdruck“ des Fräswerkzeuges, welcher in Form einer Referenzkurve (messtechnisch) ermittelt wurde. In vergleichenden Messungen von Probefräsungen an der eigens entwickelten Messeinrichtung kann der tatsächliche Verschleißgrad der Schneiden im Vergleich zur Referenzkurve bestimmt werden.

**Grundsätzliches Verfahren bzw. Aufbau zur Messung der Schnittkräfte**



Verschleißverlaufsgrenze (Kraftkomponente  $F_y$ )

Grenzkraft (Warngrenze) variabel definierbar

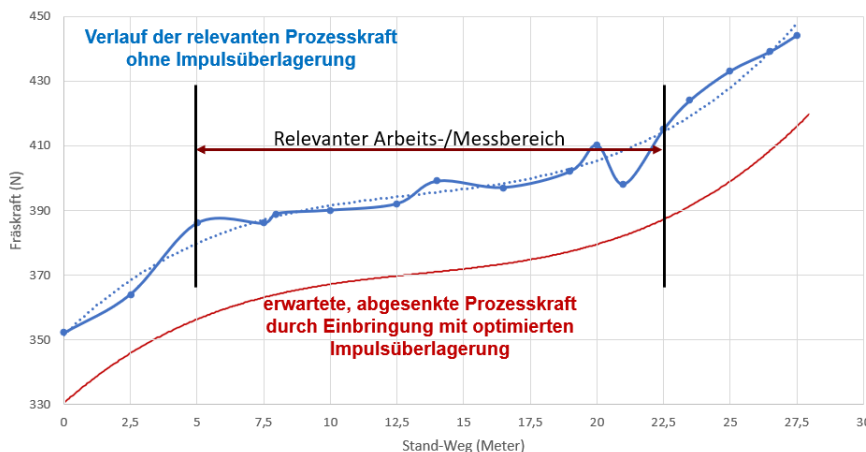
Berechneter Mittelwert aus Messwerten von zwei Umdrehungen (Fräsung am Opferwerkstück)

**Exemplarische Messergebnisse 7-Schneider // Tiefpassfilter: 95 Hz // Abtastrate: 10 kHz // Auswertesoftware: PHYTON**



**Bild 11:** Grundsätzliches Verfahren zur Messung der Prozesskräfte und zur Bestimmung der Verschleißgrenze in Abhängigkeit des Standweges

Hierzu werden jeweils Probefräsungen ohne Impulsbelastung durchgeführt und ausgewertet. Mit dem gleichen Werkzeug (gleicher Verschleißgrad) werden dann Probefräsungen bei gleichen Parametern, jedoch mit definierten Impulsbelastungen durchgeführt und ausgewertet.



Das Ergebnis sind die vergleichenden Messergebnisse der auftretenden Zerspanungskräfte bei einem genau definierten Prozesszustand (vergleiche Darstellung).

**Zusammenfassung der Erkenntnisse mit piezotechnischer Anregung:**

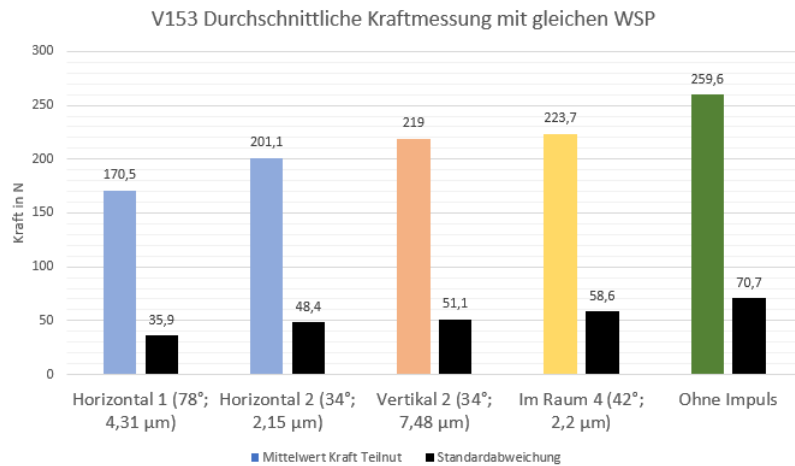
Aus den durchgeführten Versuchen können folgende Erkenntnisse gezogen werden, die im Folgenden kurz dargestellt sind.

- **Verhalten der Zerspanungskräfte in Abhängigkeit der Lage (Winkellage) der induzierten Impulsebene**

Die deutlichste Reduktion der Prozesskräfte kann mit einer horizontal eingeleiteten Impulsüberlagerung (X-Y Ebene) erreicht werden. Gemessene Reduktion gegenüber impulsfreier Fräsung bis zu ca. 30%.

- Kraftreduktion bei horizontaler Impulseinbringung am höchsten (nahezu 35 % in beispielhafter Messreihe)

**Werkstoff** 1.2312  
**Fräser** 04M.0225.151  
**WSP-Typ** MO.1003.035.04, Nero<sup>2</sup>  
**Parameter** Standardparameter,  
 $a_g = 10 \text{ mm (40 \%)}$   
**Standweg** 2,5 Meter



**Bild 13:** Beispielhafte vergleichende Darstellung der relevanten Prozesskräfte in Abhängigkeit der eingebrachten Erregungsrichtung zum Zustand ohne Impulsüberlagerung

- **Verhalten der Zerspanungskräfte in Abhängigkeit der Amplitudengröße der induzierten Impulse**

Die maximal auftretende Amplitude des Impulsvektors bei durchgeführten Versuchen mit ca. 4 µm hat zu keinen negativen Folgen (Schneidenbruch) bei Versuchen mit horizontaler Anregung geführt.

Lediglich beim Einsatz mit dem Fräser Typ „MO.1003.031.06“ (positiver Fräser mit Keilwinkel von 68,32°) traten vereinzelt Abplatzer an der Schneidkante, speziell bei dreidimensionaler Anregung bzw. Anregung in vertikaler Richtung auf.

- **Reduktion/Auswirkung der Zerspanungskräfte als Funktion der Schneidengeometrie**

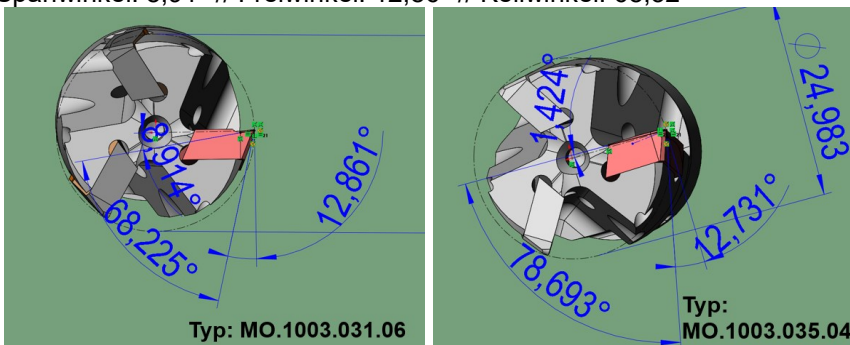
Die Versuche wurden anfangs mit den folgenden WSP-Typen durchgeführt.

**MO.1003.035.04**

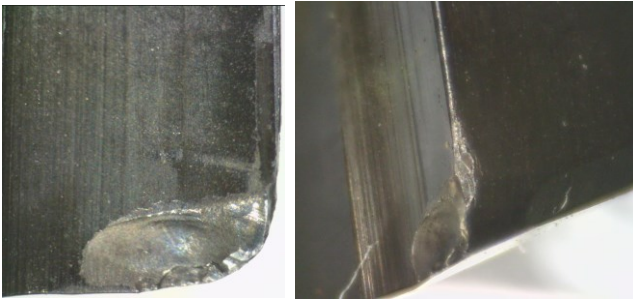
Spanwinkel: 1,42° // Freiwinkel: 12,73° // Keilwinkel: 78,69°

**MO.1003.031.06**

Spanwinkel: 8,91° // Freiwinkel: 12,86° // Keilwinkel: 68,32°



**Bild 14:** Eingesetzte WSP-Typen



**Bild 15:** Typische Schadbilder bei abgeplatzten Schneidkanten

Bedingt durch etliche Schneidenbrüche bei dem hochpositiven Typ MO.1003.031.06 und dem zerspannten Werkstoff 1.2312 (40CrMnMoS8-6 // hohe Zähigkeit; verschleißfest; Zugfestigkeit ca. 1100 N/mm<sup>2</sup>; Härte 320 HB) wurden die Versuche mit der „stabileren“ Schneidengeometrie der WSP MO.1003.035.04 durchgeführt. Die Schneidenbrüche traten im Schwerpunkt bei Impulsbelastungen mit hohem vertikalem Impulsanteil auf.

Der WSP-Typ WSP MO.1003.035.04 wurde sehr bewusst gewählt, da mit dieser Geometrie ein hoher Prozentsatz der Stahl-Werkstoffe im allgemeinen Maschinen- und Anlagenbau wirtschaftlich bearbeitet werden kann.

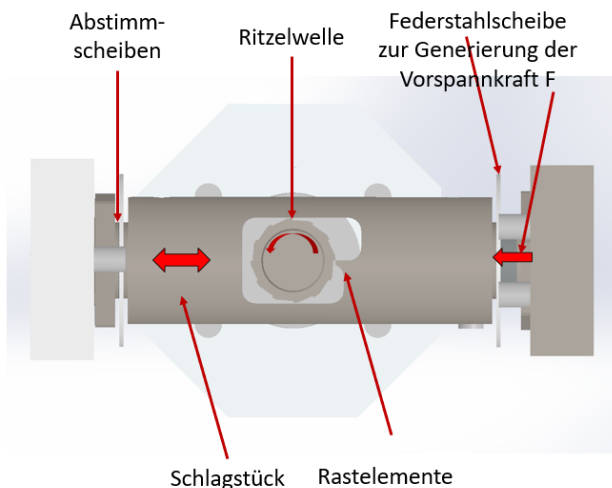
**Zusammenfassung der Erkenntnisse mit elektromechanischer Anregung:**

Bei der rein mechanischen Lösung, bei der ein schnelllaufender Elektroantrieb mit gekoppelter Polygonwelle für die Erzeugung der horizontalen Impulse eingesetzt wird (vergl. Bilder 8,9,10), ergeben sich interessante Ergebnisse.

Es zeigt sich, dass mit zunehmender Frequenz auch die prozentuale Zerspankraftreduktion zunimmt (wie erwartet). Bei der, durch die Konstruktion gegebenen Grenzfrequenz von 150Hz ist eine Reduktion der Zerspankraft um ca. 18% zu erreichen (Bild 17). Durchgeführte Versuche zeigen, dass mit der Reduktion der Zerspankraft auch die Standzeit der eingesetzten Fräswerkzeuge zunimmt. Eine detaillierte Auswertung kann jedoch erst bei den laufenden Versuchen (auch nach Projektende) ermittelt werden.

**Grundsätzlicher Lösungsansatz zur rein mechanischen Impulserzeugung**

- **Prinzip:** Mechanische Impulserzeugung durch rotierende Ritzelwelle mittels Spindelmotor mit definierter Frequenz; Ritzel gleiten periodisch über ein präzise positioniertes Schlagstück.
- **Schlagstück:** Zylindrisches Element mit passgenauer Aussparung für die Ritzelwelle, dient als Impulsgeber durch gezielten Kontakt mit den Ritzeln.
- **Schlagbolzen:** Beidseitig am Zylinder angeordnet; Positionierbarkeit auf 0,1 mm Genauigkeit mittels Abstimm-scheiben gewährleistet hohe Reproduzierbarkeit der Impulse.

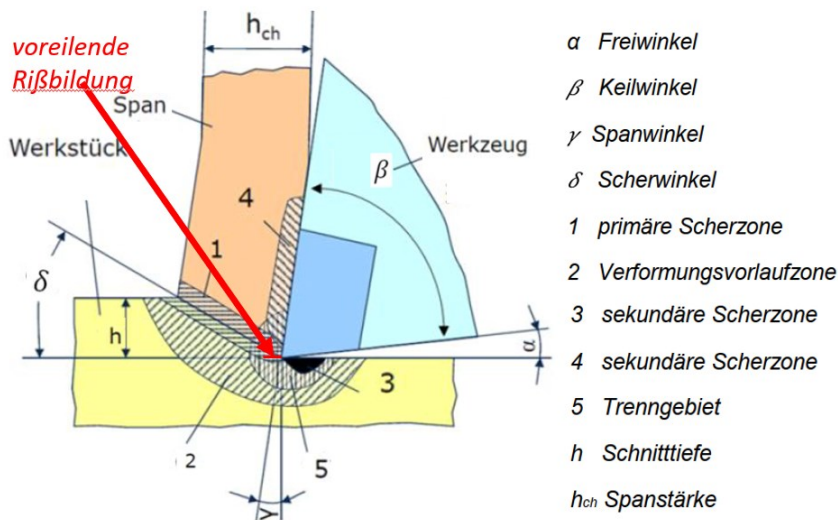


**Bild 16:** Wirkungsweise des Systems zur mechanischen Impulserzeugung

**Theoretische Betrachtung der Vorgänge am Wirkort der Zerspanung in Abhängigkeit der Winkellage der Impulsebene**

Bei der klassischen Zerspanung entsteht im Zentrum der Scherzone ein voreilender Riss in Richtung der Schnittebene (Trenngebiet). Die Späne werden mit hoher Reibung über die Spanfläche des Schneidwerkstoffes

geschoben und dabei abgeschert. Bei diesem Prozess entstehen hohe Temperaturen (deutlich höher als im Trenngebiet), die über die Späne abgeführt werden. Das Ziel einer impulsüberlagerten Zerspanung ist die Reduktion der Trennarbeit und die Reduktion der Friktion und der zu verrichtenden Scherarbeit entlang der Spanfläche durch einen quasi diskontinuierlichen Schneideneingriff.



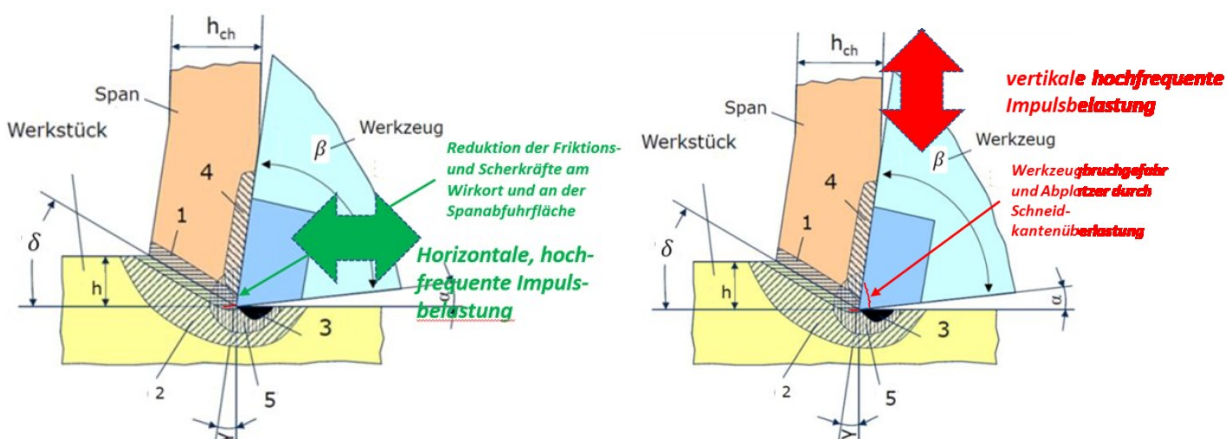
**Bild 17:** Grundsätzliche Situation beim Zerspanvorgang

Durch den Kontakt des Werkzeugs wird der zu bearbeitende Werkstoff an der Spanfläche der Schneide zusammengepresst und plastisch gestaucht (Trenngebiet). Die höchste Belastung ist dabei an der Schneidkante.

Der Vorschub bewirkt einen Schnittdruck (Spannungen) im Werkstoff, der die innere **Zusammenhangs- und Widerstandskraft** des Werkstoffgefüges überwindet, so dass sich vor der Schneide ein **voreilender Riss** in Hauptrichtung des Schnittdrucks bildet (Verformungsvorlaufzone). Die Richtung dieser Vorlaufzone liegt in der horizontalen Trennebene.

Bei weiterer Werkzeugbewegung wird der gestauchte Span an der Spanfläche hochgeschoben und abgeschert (Scherzone). Die Späne trennen sich vom Werkstück und gleiten an der Spanfläche ab (sekundäre Scherzone).

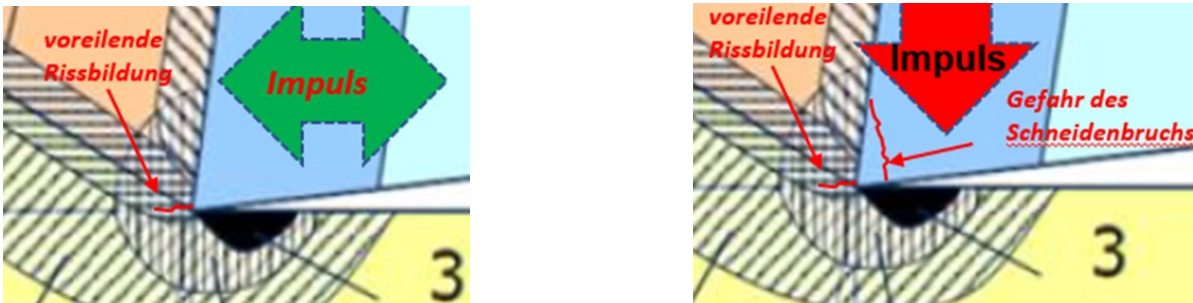
Wird in Vorschubrichtung (Richtung der Trennebene) eine gleichgerichtete, **horizontal wirkende**, hochfrequente Impulsüberlagerung eingeleitet, so bewirkt dies in der Trennebene eine Wechselwirkung von Druck- und Entspannungsvorgängen (diskontinuierlicher Eingriff), die die **Zusammenhangs- und Widerstandskräfte** des Werkstoffgefüges deutlich reduzieren. Die Reduktion erfolgt sowohl in der Trennebene als auch in der Scherzone, da beide Ebenen gleichgerichtet sind.



**Bild 18:** Alternative Wirkrichtungen der überlagerten Impulsbelastung

Wird in Vorschubrichtung (Richtung der Trennebene) eine orthogonal zur Vorschubrichtung, **vertikal wirkende**, hochfrequente Impulsüberlagerung eingeleitet, so bewirkt dies in der Trennebene, orthogonal zur Oberfläche,

Druckkräfte, die jedoch **keine Entlastung in Richtung der Trennebene** bewirken. Speziell bei hochpositiven Schneiden (kleiner Keilwinkel) wächst mit dieser Druckbelastung die Gefahr des Schneidenbruchs. Neben diesem negativen Effekt wird jedoch auch bei vertikaler Impulseinleitung eine Reduktion der wirkenden Kräfte in der sekundären Scherzone (Spanabfuhrfläche) als positiver Effekt festgestellt. Dieser sollte jedoch geringer als bei einer horizontalen Anregung ausfallen, da die Wirkrichtungen der beiden Ebenen parallel verlaufen.

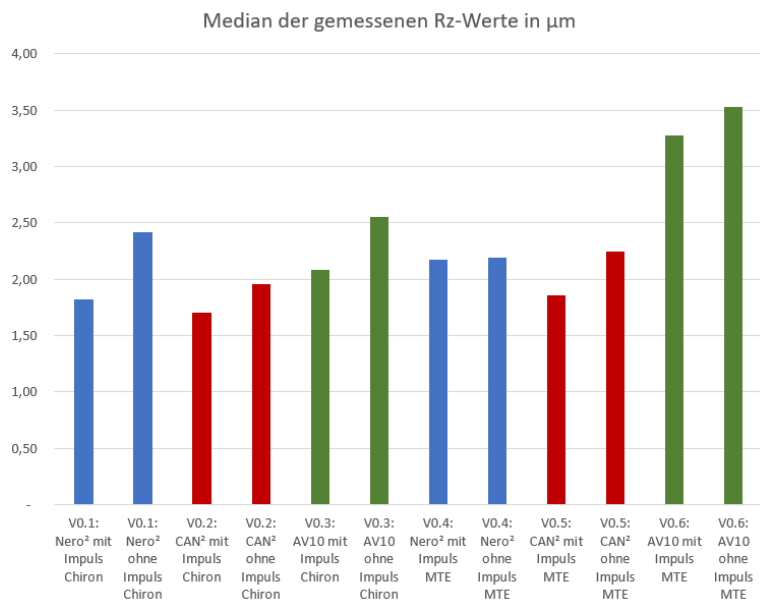


**Bild 19:** *Detaildarstellung in der Wirkzone bei horizontaler bzw. vertikaler Impulseinbringung*

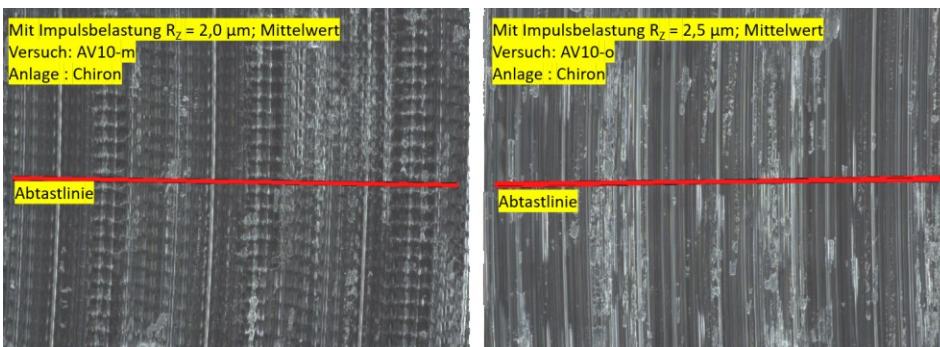
**Auswirkung des impulsbelasteten Fräsprozesses auf die Qualität der Oberfläche**

Neben der Absenkung der Prozesskräfte ist festzustellen, dass sich eine Verbesserung der Oberflächenqualität (erzielbarer Rz-Wert) erreichen lässt.

Hierzu wurden Versuche mit variierenden Parametern (auch auf unterschiedlichen Werkzeugmaschinen zum direkten Vergleich) durchgeführt. Die Verbesserung liegt bei ca. 0,5 -1,0 µm.



**Bild 20:** *Beispielhafte Darstellung der erreichbaren Verbesserung der Oberflächenrauheit bei Impulsüberlagerung mit unterschiedlichen Fräsern und Werkzeugmaschinen*



**Bild 21:** *Beispielhafter Darstellung der realisierten Oberflächengüten*

## **I.5 Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen**

Während des Vorhabens wurde kein Fortschritt im Umfeld des Impulsfräsens an anderer Stelle bekannt.

## **I.6 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Das Hauptanwendungsgebiet des neuen Verfahrens soll ganz bewusst nicht eine Nischentechnologie (wie z.B. „schwerstzerspanbare“ Werkstoffe oder die Mikrobearbeitung), sondern die „breite Masse“ von Fräsanwendungen bei hohem Zerspanungsvolumen in der Serienproduktion sein.

AVANTEC plant, speziell die Impulserregung mittels elektromechanischer Anregung in einem bereits laufenden, internen Projekt weiterzuentwickeln und zur Serienreife zu führen. Wesentlich ist dabei die Einhaltung eines Kostenrahmens und die Implementierung der Technologie in die Spannaufnahme der Werkstücke. Entgegen der ursprünglichen Planung, den Impulserreger in die Spindel der Werkzeugmaschinen zu integrieren, wird mit der entwickelten Lösung in der Spannaufnahme (Schraubstock) ein sehr viel breiteres Anwendungsfeld (auch bei bestehendem Maschinenpark) erschlossen.

Es ist weiterhin geplant, die Ergebnisse des bereits abgeschlossenen Förderprojektes „Verschleißdiagnose“ (ebenfalls im Förderprogramm KMU-innovativ) mit in die Einrichtung des Impulserzeugungssystems zu integrieren. Damit kann dann eine integrierte Lösung zur Verschleißdiagnose und Impulserzeugung in einer Einheit am Markt angeboten werden.

Die geplante integrierte Gesamtsystem kann von allen Nutzern/Anwendern eingesetzt werden (völlig unabhängig vom eingesetzten Werkzeugmaschinentyp). Die mit der Nutzung der Technologie verbundenen Wettbewerbsvorteile sind vor allem:

- o Höhere Zerspanungsleistungen.
- o Reduzierter Energieeinsatz.
- o Stabile Zerspanungssituation mit reduzierter Ausfallwahrscheinlichkeit durch Schneidenbruch (Erkennen der Verschleißgrenze).
- o Verbesserte Späneabfuhr bei deutlich reduzierter Wärmeentwicklung.
- o Verbesserte Standzeit.

Neben dem bisherigen klassischen Vertrieb von Hochleistungswerkzeugen, beabsichtigt AVANTEC, mit dem neuen System ein zweites leistungsstarkes Geschäftsfeld aufzubauen. Die Vermarktung des neuen Gesamtsystems soll als eigenes Produkt über den eigenen Vertrieb, wie auch in enger Kooperation mit unterschiedlichen Werkzeugmaschinenherstellern (primär Kunzmann und CHIRON) und Key-Kunden realisiert werden. Es ist davon auszugehen, dass im Rahmen der Entwicklung weitere Schutzrechte entstehen (bei der Vergabe von Unteraufträgen soll vertraglich sichergestellt werden, dass die Rechte am Ergebnis ohne Einschränkung von AVANTEC genutzt und verwertet werden können).

Durch die Entwicklung wird die Wettbewerbsfähigkeit, die Innovationskraft und die Exportfähigkeit in diesem (aus volkswirtschaftlicher Sicht) sehr wichtigen Marktbereich auch gegen Wettbewerber aus Asien gestärkt.

Die momentane schwierige wirtschaftliche Situation, vor allem in Europa, erschwert eine Abschätzung der erzielbaren Umsätze und der Einführungsgeschwindigkeit des Systems.

## **I.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes**

Neben der intensiven Zusammenarbeit mit den assoziierten Partnern, besteht eine enge Kooperation mit dem Steinbeiszentrum für Produktion und Organisation (Hochschule Pforzheim). Im Rahmen des Projektes wurden mehrere Abschlussarbeiten von Studenten der Fakultät für Technik in Zusammenarbeit mit AVANTEC

durchgeführt. Die Ergebnisse hierbei wurden in Kolloquien an der Hochschule in Pforzheim bzw. direkt bei AVANTEC in Illingen vorgestellt.

Eine Weitergehende Zusammenarbeit mit anderen Organisationen wurde bisher nicht durchgeführt, da eine weitere Patentanmeldung (speziell im Umfeld der mechanischen Impulserregung) geplant ist und der Neuheitsgrad durch eine eventuelle Vorveröffentlichung nicht gefährdet werden soll.

### **I.8 Veröffentlichungen, Vorträge Referate, etc.**

Auszugsweise wurden Projektinhalte bei den unter I.7 genannten Kolloquien an der Hochschule Pforzheim vorgestellt. Weiterhin fand eine auszugsweise Veröffentlichung anlässlich der Technologietage von AVANTEC in Illingen im Mai 2025 statt.

Eine Veröffentlichung für die breite Fachwelt ist anlässlich der EMO 2026 (September) in Hannover geplant. AVANTEC als aktives Mitglied im Fachverband „Präzisionswerkzeuge“ des VDMA, will die Ergebnisse in der jährlich stattfindenden Tagung vorstellen.

Weiterhin sind Fachveröffentlichungen in 2026 in den Zeitschriften „Transfer“ (Steinbeismagazin) und wt-Werkstattstechnik (VDI Fachmedien) geplant.