
BACHELORARBEIT

Herr
Abhishek Arvindbhai Borisagar

**Ermittlung und Validierung
der Medienmenge beim
Kryogenen Fräsen**

Mittweida, 2022

BACHELORARBEIT

Ermittlung und Validierung der Medienmenge beim Kryogenen Fräsen

Autor:
Herr Abhishek Arvindbhai Borisagar

Studiengang:
Maschinenbau

Seminargruppe:
MB19wF-B

Erstprüfer:
Prof. Dr.-Ing. Ruben Bauer

Zweitprüfer:
M.Sc. Sebastian Döring

Einreichung:
Mittweida, 09.12.2022

Verteidigung/Bewertung:
Mittweida, 2023

Bibliografische Angaben

Borisagar, Abhishek Arvindbhai:

Ermittlung und Validierung der Medienmenge beim Kryogenen Fräsen.

Determination and Validation of the amount of liquid used in Cryogenic Milling.

- 68 S. Mittweida, Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences,
Fakultät Maschinenbau,

Bachelorarbeit, 2022

Referat:

Die vorliegende Bachelorarbeit befasst sich mit der Bestimmung des Bedarfs an Medium Menge beim Kryogene Fräsen in Abhängigkeit von den Prozessparametern. Zu diesem Ziel wurde zuerst der Kryogene Fräsprozess detaillierter betrachtet und dann die theoretischen Untersuchungen durchgeführt. Nach der Kombination der Zerspanungstechnologie mit den Gesetzen der Thermodynamik wurde ein mathematisches Modell erstellt. Zur Validierung des theoretischen Modells wurden verschiedene praktische Versuche durchgeführt, deren Ergebnisse hier dokumentiert sind.

Vorwort

Die vorliegende Bachelorarbeit ist von Oktober 2022 bis Dezember 2022 am Fraunhofer IWU am Standort Chemnitz, Abteilung Zerspanungstechnik, geschrieben wurde. Diese Bachelorarbeit wurde unter der Betreuung von Dr.-Ing. Ruben Bauer von der Hochschule Mittweida, Fachbereich Maschinenbau und M.Sc. Sebastian Döring am Fraunhofer IWU in Chemnitz geschrieben. Ich möchte alle bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Bachelorarbeit unterstützt haben

Einen besonderen herzlichen Dank möchte ich Herr Prof. Dr.-Ing. Ruben Bauer aussprechen, der mich während des Praktikums und auch der Abschlussarbeit immer unterstützt und viel geduldig begleitet hat, sowie Herr Dipl.-Ing. Sebastian Döring für die technische und organisatorische Unterstützung und die Übernahme der Zweitkorrektur. Mit seinen fachlichen Kenntnissen und seinen hilfreichen Vorschlägen habe ich immer wertvolle Unterstützung bekommen.

Des Weiteren möchte ich mich bei Herr Oehme Jens und Herrn Schneider Jörg bedanken, die mich im Rahmen meiner Bachelorarbeit im Unternehmen mit den Erkenntnissen der CNC-Maschinen- und Messtechnik unterstützt haben und somit diese Arbeit für mich möglich gemacht haben. Außerdem Herr Vincent Kahle und Herr Heidrich Jürgen für ihre Unterstützung bei der Thermokamera. Ich danke auch meinen Kollegen am Fraunhofer IWU, die mich während der gesamten Zeit mit guten Empfehlungen unterstützt und mir die Arbeit sehr vereinfacht haben.

Abschließend möchte ich mich besonders bei meiner Familie bedanken, insbesondere bei meinem Vater, Herr Arvindbhai Borisagar, der diese Studie ermöglicht und mich die ganze Zeit unterstützt hat. Danke Papa, Mom und Diii !!!

Inhaltsverzeichnis

Bibliografische Angaben	I
Vorwort.....	II
Inhaltsverzeichnis	III
Formelverzeichnis.....	V
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	X
1 Einleitung.....	- 1 -
1.1 Firmenportrait Fraunhofer IWU.....	- 1 -
1.2 Problemstellung	- 2 -
1.3 Zielsetzung und Herangehensweise.....	- 2 -
1.4 Aufbau der Arbeit	- 3 -
2 Stand der Technik und der Forschung	- 5 -
2.1 Grundlagen der Fertigungsverfahren.....	- 5 -
2.2 Kunststoffe und Hochwarmfeste Werkstoffe.....	- 7 -
2.3 Kühlschmierstoffe.....	- 9 -
2.4 Ansatz für Kühlschmierstoffe.....	- 10 -
2.4.1 Nassbearbeitung.....	- 11 -
2.4.2 Trockenbearbeitung	- 12 -
2.4.3 Minimalmengenschmierung	- 12 -
2.4.4 Kryogene Kühlung.....	- 12 -
2.4.5 MMS + Kryo	- 15 -
2.5 Kryogene Anlagentechnik und Zuführkonzepte	- 17 -
2.6 Grundlagen des Kryogenen Fräsens.....	- 20 -
2.7 Einteilung der Wärme in der Zerspanungstechnik	- 22 -
3 Mathematische Modell	- 23 -
3.1 Teil Fertigung	- 23 -
3.1.1 Ermittlung der Schnitt- und Vorschubkraft beim Fräsen.....	- 24 -
3.1.2 Winkeln und Kräfte zwischen Werkstück und Werkzeug	- 24 -
3.1.3 Berechnung der Kräfte	- 28 -
3.2 Teil Thermodynamik.....	- 35 -
3.3 Fertigung - Thermodynamik	- 36 -

4	Experimentelle Untersuchungen	- 38 -
4.1	Werkstoffeigenschaften.....	- 38 -
4.2	Werkstoff Geometrie	- 38 -
4.3	Messtechnik zur Temperaturmessung.....	- 39 -
4.3.1	Thermoelement.....	- 40 -
4.3.2	Thermokamera InfraTec VarioCAM® hr head.....	- 41 -
4.4	CO2 Kühlanlage.....	- 42 -
4.5	Versuchsaufbau	- 45 -
4.6	Versuchsreihe	- 47 -
5	Auswertung	- 50 -
5.1	Probe Experiment	- 50 -
5.2	Schnitttiefe Änderung.....	- 56 -
5.3	Schnittgeschwindigkeit Änderung.....	- 58 -
5.4	Vorschub Änderung.....	- 61 -
5.5	Volumenstrom Änderung.....	- 63 -
5.6	Systematische Fehler.....	- 65 -
6	Zusammenfassung und Ausblick	- 67 -
	Literaturverzeichnis	XI
	Anlagen	XVII
	Eigenständigkeitserklärung	XXIII

Formelverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
f	[mm]	Vorschub
f _z	[mm]	Vorschub je Schneide
Z		Schneidenanzahl
v _c	[m/min], [m/s]	Schnittgeschwindigkeit
D	[mm]	Durchmesser
n	[min ⁻¹]	Drehzahl
π		Pi(3,14)
v _f	[mm/min]	Vorschubgeschwindigkeit
b	[mm]	Spanungsbreite
a _p	[mm]	Schnitttiefe
κ _r	[°]	Werkzeug – Einstellwinkel
h _m	[mm]	mittlere Spanungsdicke
k _{f1*1}	$\left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^{2-mc}} \right]$	spezifische Vorschubkraft für = 1,0 mm x 1,0 mm
k _{c1*1}	$\left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^{2-mc}} \right]$	spezifische Schnittkraft für A = 1,0 mm x 1,0 mm
m _c		Exponent (empirisches Zerspankraftmodell nach KIENZLE, VICTOR)
m _f		Exponent (empirisches Zerspankraftmodell nach KIENZLE, VICTOR)
F _{CZ} ^{mittel}	[N]	Schnittkraft für eine Schneide
F _{fZ} ^{mittel}	[N]	Vorschubkraft für eine Schneide
Z _{E_{max}}		maximale Schneideneingriffszahl
Q _E	[°]	Eingriffswinkel
F _C ^{mittel}	[N]	Schnittkraft(Mittlere)
F _f ^{mittel}	[N]	Vorschubkraft(Mittlere)
P _C	[KW]	Schnittleistung
P _f	[KW]	Vorschubleistung
P _U	[KW]	Gesamtleistung
ρ	$\left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right]$	Dichte

m	[Kg]	Masse
V	[l]	Volume
\dot{m}	$\left[\frac{\text{Kg}}{\text{s}}\right]$	Massenstrom
\dot{V}	[l/s]	Volumenstrom
c	$\left[\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}\right]$	Spezifische Wärmekapazität
ΔT	[K]	Temperatur Differenz
Q	[J]	Warme

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 :- Fraunhofer IWU, (Chemnitz) (G)	- 1 -
Abbildung 2 :- Aufbau der Arbeit.....	- 4 -
Abbildung 3 :- Fertigungsverfahren (DIN 8580) [4]	- 6 -
Abbildung 4 :- Zone Verteilung in Trennen [5]	- 7 -
Abbildung 5 :- Klassifizierung der Kühlschmierstoffe [8].....	- 10 -
Abbildung 6 :-Arten der Schmierung [16].....	- 10 -
Abbildung 7 :- Kryogene Fräsen[K].....	- 13 -
Abbildung 8 :-Phasendiagramm [45]	- 14 -
Abbildung 9 :- KSS Strategien[21]	- 16 -
Abbildung 10 :- CO2 Kühl-Schmiersystem [1]	- 19 -
Abbildung 11 :- Fräsen Typen [8]	- 20 -
Abbildung 12 :- Einteilung der Wärme [8]	- 22 -
Abbildung 13 :- Winkeln, Schnitt- Vorschubrichtungen beim Fräsen [4]	- 25 -
Abbildung 14 :- Zerspankraft Komponenten beim Fräsen [4]	- 26 -
Abbildung 15 :- Kinematik beim Fräsen [4].....	- 26 -
Abbildung 16 :- Werkzeugeingriff beim Fräsen [4].....	- 27 -
Abbildung 17 :- Schnittkraftverlauf beim Stirnfräsen[3]	- 27 -
Abbildung 18 :- Flussdiagramm zur Ermittlung der Leistung	- 28 -
Abbildung 19 :- Darstellung von a_p , a_e und κ_r [48].....	- 29 -

Abbildung 20 :- mittlere Spannungsdicke	- 30 -
Abbildung 21 :- Werkstück.....	- 39 -
Abbildung 22 :- Das Prinzip der sensorischen Fräsfutter (in mm).....	- 41 -
Abbildung 23 :- InfraTec VarioCAM hr head	- 42 -
Abbildung 24 :- ChilAire CO ₂ -Kühlsystem[31]	- 43 -
Abbildung 25 :- Verwendete Sachen im Versuch	- 45 -
Abbildung 26 :- Versuchsaufbau.....	- 46 -
Abbildung 27 :- Verlauf des Werkzeugs am Werkstück.....	- 48 -
Abbildung 28 :- (Temperatur vs. Zeit) Thermoelement	- 50 -
Abbildung 29 :- Temperatur V/S Zeit verlauf in Zerspanungsprozess	- 51 -
Abbildung 30 :- Seitenansicht des Werkstücks.....	- 52 -
Abbildung 31 :- (Temperatur vs. Zeit) Thermokamera	- 55 -
Abbildung 32 :- (Temperatur vs. Zeit) Werkzeugaufnahme Sensor	- 56 -
Abbildung 33 :- (Temperatur vs. Zeit) Thermokamera	- 57 -
Abbildung 34 :- (Temperatur vs. Zeit) Werkzeugaufnahme Sensor	- 57 -
Abbildung 35 :- (Temperatur vs. Zeit) Thermoelement	- 58 -
Abbildung 36 :- (Temperatur vs. Zeit) Thermokamera	- 59 -
Abbildung 37 :- (Temperatur vs. Zeit) Werkzeugaufnahme Sensor	- 60 -
Abbildung 38 :- (Temperatur vs. Zeit) Thermoelement	- 60 -
Abbildung 39 :- (Temperatur vs. Zeit) Thermokamera	- 61 -
Abbildung 40 :- (Temperatur vs. Zeit) Werkzeugaufnahme Sensor	- 62 -

Abbildung 41 :- (Temperatur vs. Zeit) Thermoelement - 62 -

Abbildung 42 :- (Temperatur vs. Zeit) Thermokamera - 63 -

Abbildung 43 :- (Temperatur vs. Zeit) Werkzeugaufnahme Sensor - 64 -

Abbildung 44 :- (Temperatur vs. Zeit) Thermoelement - 65 -

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 :- KSS- Zuführkonzepte [1]	- 17 -
Tabelle 2 :- Mischsysteme von verschiedenen Unternehmen [1,20]	- 18 -
Tabelle 3 :- Einflussvariablen auf die Prozesswärme	- 23 -
Tabelle 4 :- Maschinenparameter	- 30 -
Tabelle 5:- Schnittgrößen	- 31 -
Tabelle 6 :- Zerspankraft Kennwerte [3].....	- 31 -
Tabelle 7:- Berechnung für Schnitt – Vorschubkraft pro Zahn	- 32 -
Tabelle 8 :- Berechnung für mittlere Schnitt – Vorschubkraft.....	- 33 -
Tabelle 9 :- Vorschub- Schnittleistung Berechnung.....	- 34 -
Tabelle 10 :- E295 Daten Blatt [L].....	- 38 -
Tabelle 11 :- Technische Daten (Thermokamera)[M]	- 41 -
Tabelle 12 :- Versuchsreihe.....	- 47 -
Tabelle 13 :- Vergleich zwischen Pu theo und Pu Pr. Ab.....	- 53 -
Tabelle 14 :- Vergleich zwischen Pu theo und Pu EP.....	- 53 -
Tabelle 15 :- Berechnung der Kühlwirkung.....	- 54 -
Tabelle 16 :- Berechnung der extrapolierte Kühlwirkung.....	- 54 -

1 Einleitung

1.1 Firmenportrait Fraunhofer IWU

Das Fraunhofer IWU ist ein Geschäftsbereich der Fraunhofer-Gesellschaft und steht für Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU). Es wurde 1991 mit anfänglich 37 Mitarbeitern gegründet und hat heute ca. 670 hochqualifizierte Mitarbeiter. Dabei ist es an verschiedenen Standorten in Deutschland vertreten, wie Chemnitz, Dresden, Leipzig, Wolfsburg und Zittau. Dort ist es für die Entwicklung auf dem Fachgebiet der Produktionstechnik zuständig [A].

Das IWU betreibt innovative Forschung auf dem Sektor der Fertigung im Automobil- und Maschinenbau, der Luft- und Raumfahrttechnik, der Medizintechnik, der Elektrotechnik sowie der Feinwerk- und Mikrotechnik [A]. Das Fraunhofer IWU ist das führende Institut für ressourceneffiziente Produktion und entwickelt Technologien und intelligente Produktionssysteme für Karosserie- und Antriebsstrangkomponenten und die Optimierung der verschiedenen Fertigungsstufen von Umform-, Trenn- und Fügeprozessen. Das Institut erkennt technologische Trends frühzeitig und ist stets bereit, auf verschiedenen Gebieten zu forschen [A]. Es ist ein multinationales Unternehmen mit Niederlassungen in Europa, USA, Asien, Afrika und dem mittleren Osten [J]. Am Fraunhofer IWU laufen zahlreiche Projekte in den Bereichen kryogenes Fräsen, Fuel Cell Technologie, Monitoring-System für Werkzeugmaschinen, Entwicklung eines visuellen Assistenzsystems zur Optimierung von Fügeprozessen und vielen mehr [H,I].



Abbildung 1 :- Fraunhofer IWU, (Chemnitz) (G)

1.2 Problemstellung

Die Zerspanungsindustrie entwickelt sich schnell. Ein Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Reduzierung der Umweltbelastung. Fast alle Metallbearbeitungen werden mit Schmierstoffen durchgeführt. Kühlschmierstoffe kosten ca. 17 % der gesamten Maschinenkosten [2]. In der Industrie werden meist Schmierstoffe auf Öl-Basis verwendet, die nur schwer in der Umwelt zu entsorgen sind. Ein weiteres Problem ist der Befall mit Mikroorganismen der Emulsionen. Außerdem sind regelmäßige Prüfungen, Wartungen, Rückkühlung, Aufbereitung und Zugabe von Additiven zur Verbesserung der Eigenschaften erforderlich. Auch medizinische Studien haben gezeigt, dass diese sehr schädlich für die menschliche Gesundheit sind und oft Hautkrankheiten und Allergien verursachen. Somit ist es notwendig neue Lösungen zu finden.

Das Fräsen ist ein spanendes Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide, das in der Industrie weit verbreitet ist und zur Herstellung einer Vielzahl von Geometrien verwendet wird. Um die Prozessqualität zu erhöhen, kann während der Bearbeitung Emulsion zugeführt werden.

Die Emulsion dient zur Kühlung und Schmierung des Fertigungsprozesses und zum Wegspülen der dabei entstehenden Späne. Bei der Bearbeitung von Hochleistungswerkstoffen stößt die Kühlwirkung der Emulsionen, durch die hohe Prozesswärme, an deren Grenze. Bei der Bearbeitung von einigen speziellen Kunststoffen entstehen durch die Prozesskühlung mit Emulsion Kontaminationen am Werkstück. Dies erfordert eine nachfolgende Reinigung der Werkstücke. Um all diese Hürden zu überwinden und für eine geeignete Bearbeitung dieser Werkstoffe, ist eine kryogene Kühlung prädestiniert.

1.3 Zielsetzung und Herangehensweise

Das Ziel dieser Arbeit ist es, den Bedarf der Medienmenge beim kryogenen Fräsen in Abhängigkeit der Prozessparameter zu bestimmen. Kryogenes Fräsen ist ein Hybrides Verfahren, bei dem tiefkalte Medien, wie flüssiges CO_2 , zur Kühlung verwendet werden. Die Kühlwirkung von CO_2 ist höher als die von Emulsionen und arbeitet außerdem rückstandsfrei. Das flüssige CO_2 wird dabei in die Schnittzone zugeführt.

Beim Austritt am Werkzeug verdampft das CO_2 und es erfolgt eine Entspannung des Mediums, wobei der Umgebung Wärme entzogen wird. Um die Qualität des Prozesses zu erhöhen, wird mitunter eine kleine Menge Öl beigemischt. Dabei reduziert sich die Reibung im Prozess.

Zuerst wird das kryogene Fräsen von Grund auf betrachtet und alle Parameter analysiert, die für die Wärmeentstehung verantwortlich sind. Parallel wird der Stand der Technik und Wissenschaft recherchiert, um die Entwicklung des kryogenen Fräsens auf dem industriellen Markt zu verfolgen. Anschließend werden mathematische Berechnungsmodelle aufgestellt, indem die Formeln der Thermodynamik mit den Formeln der Fertigungstechnik kombiniert werden.

Nach der Erstellung eines mathematischen Modells werden zur Validierung des Modells verschiedene Versuchsreihen durchgeführt und anschließend werden die theoretischen Ergebnisse mit den praktischen Ergebnissen überprüft.

1.4 Aufbau der Arbeit

Die Gliederung der Arbeit (Abbildung 2) beginnt mit einer kurzen Vorstellung der Firma Fraunhofer IWU, bei der diese Bachelorarbeit erstellt wurde. Danach werden die bestehenden Probleme, Herausforderungen und Beeinträchtigungen von KSS sowie die Zielsetzung der Arbeit erläutert. Das zweite Kapitel behandelt alle Themen, die zur Erstellung dieses Konzepts herangezogen wurden, darunter Informationen über KSS, die Grundlagen des kryogenen Fräsens und die Wärmeausbreitung in der Zerspanungstechnik. Außerdem werden die neuesten Forschungen und Analysen auf dem Gebiet der kryogenen Kühlung behandelt.

Informationen über das mathematische Modell, das zur Ermittlung der kryogenen Medienmenge verwendet wird, finden sich in Kapitel 3, ebenso Informationen über die experimentellen Untersuchungen zur Validierung des Modells in Kapitel 4. Anschließend werden in Kapitel 5 die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und ausgewertet. Zum Schluss werden die zukünftigen Aspekte und die Zusammenfassung des Themas in Kapitel 6 erläutert.

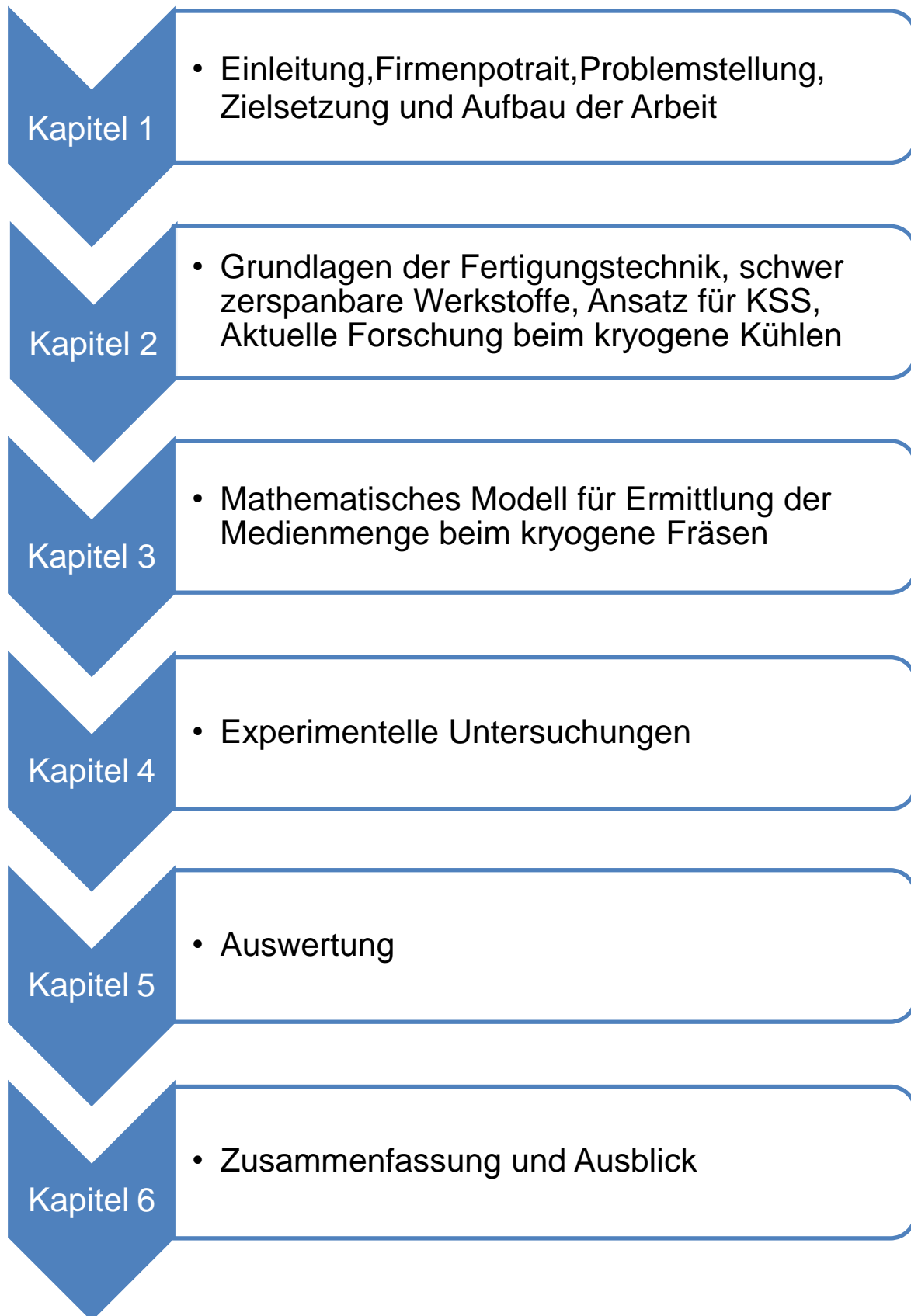


Abbildung 2 :- Aufbau der Arbeit

2 Stand der Technik und der Forschung

Die Anforderungen an die Kosteneinsparungen in industriellen Prozessen steigen im Zeitalter von Industrie 4.0 und neuen Technologien stetig. Die Produktionstechnik ist für die deutsche Industrie von großer Bedeutung, so dass Nachhaltigkeit, Ressourcenschonung, Wirtschaftlichkeit und Effizienz verbessert werden müssen. Um die Arbeitsplätze in der deutschen Industrie langfristig zu sichern, werden Produktivitätssteigerungen von mehr als 20% als notwendig erachtet [1].

Viele Werkstoffe, wie z.B. PEEK, die in der Medizintechnik eingesetzt werden, können wegen der Gefahr des Schmelzens nicht mit hohen Schnittgeschwindigkeiten bearbeitet werden, was zu Produktivitätseinbußen führt. Sie können auch nicht mit Kühlschmierstoff bearbeitet werden, da die Gefahr der Verunreinigung besteht und hohe Sauberkeitsanforderungen gelten. Einige Stähle und Titanlegierungen lassen sich aufgrund ihrer hohen Festigkeit auch mit Kühlschmierstoff nur sehr schwer bearbeiten, was zu thermomechanischen Werkzeugverschleiß führt [1].

Zur Erstellung eines mathematischen Modells für den Bedarf der Medienmenge beim kryogene Fräsen ist es sehr wichtig, von den grundlegenden Blöcken des Prozesses bis zum neuesten Stand der Entwicklung und Forschung auszugehen. In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen der Fertigungsverfahren erläutert, insbesondere das Fräsen und das kryogene Fräsen, die Wärmeabteilung in der Zerspanungstechnik, Kühlschmierstoffe und verschiedene Strategien zur Anwendung, Technik und Ausstattung zur Wärmemessung.

2.1 Grundlagen der Fertigungsverfahren

Die DIN 8580 gliedert die Fertigungsverfahren in sechs Hauptgruppen: Urformen, Umformen, Trennen, Fügen, Beschichten und Stoffeigenschaftsänderung. Die Hauptgruppe Trennen wird weiterhin in sieben Untergruppen aufgeteilt: Trennen, Bearbeiten mit geometrisch bestimmter Schneide, Bearbeiten mit geometrisch unbestimmter Schneide, Abtragen, Zerlegen, Reinigen und Evakuieren [3].

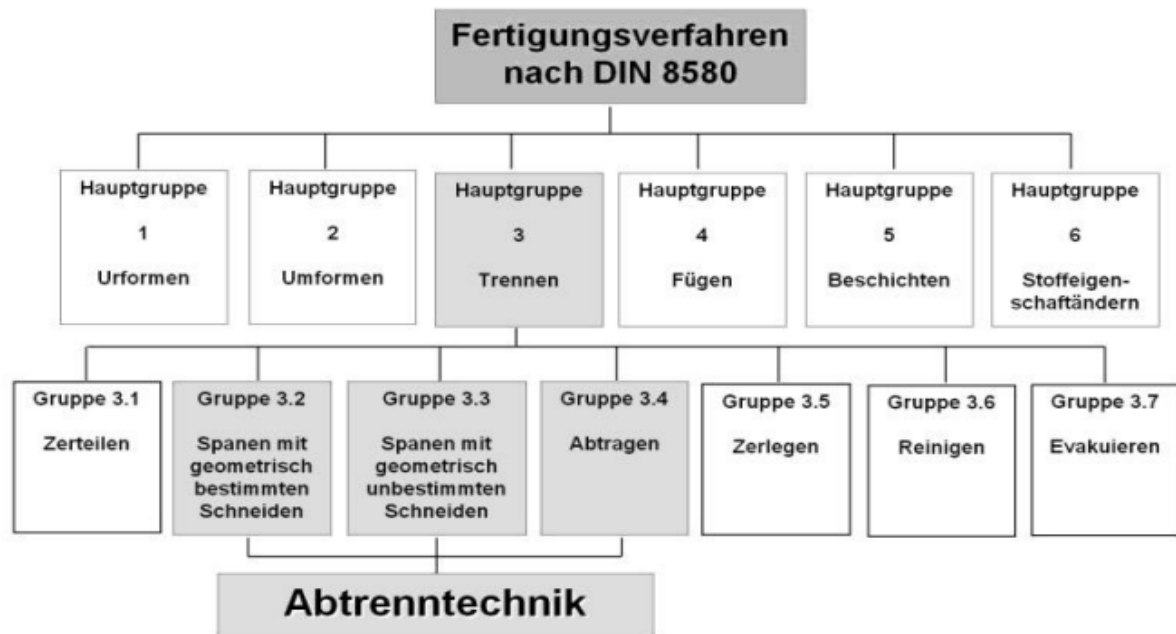


Abbildung 3 :- Fertigungsverfahren (DIN 8580) [4]

Das Fräsen ist eine der am häufigsten verwendeten Techniken zur Herstellung kreativer Teile mit präzisen Toleranzen. Es gehört zu den spanabhebenden Verfahren mit geometrisch bestimmten Schneiden, wie Drehen und Bohren [3,8]. Obwohl das grundlegende Prinzip hinter all diesen Verfahren gleich ist, unterscheidet es sich von ihnen in Hinblick auf die Geometrie, die Anzahl und den Zustand des Schneidens am Werkstück [9]. Grundsätzlich gibt es bei all diesen Trennenden Fertigungsverfahren zwei Teilnehmer, ein Werkzeug und ein Werkstück. Das Werkzeug hat eine scharfe Schneide, die in das Werkstück eindringt und durch die Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug wird eine Schnittkraft ausgeübt. Durch die daraus resultierende Verformung heben sich Späne vom Werkstück ab [3]. Es gibt verschiedene Arten der Spanformung, wie z.B. Reißspan, Scherspan, Fließspan und Lamellenspan, wobei die Form des Spanes, die Kraftschwankungen, die Oberflächenqualität und die Qualität des Verfahrens bestimmt werden können [8].

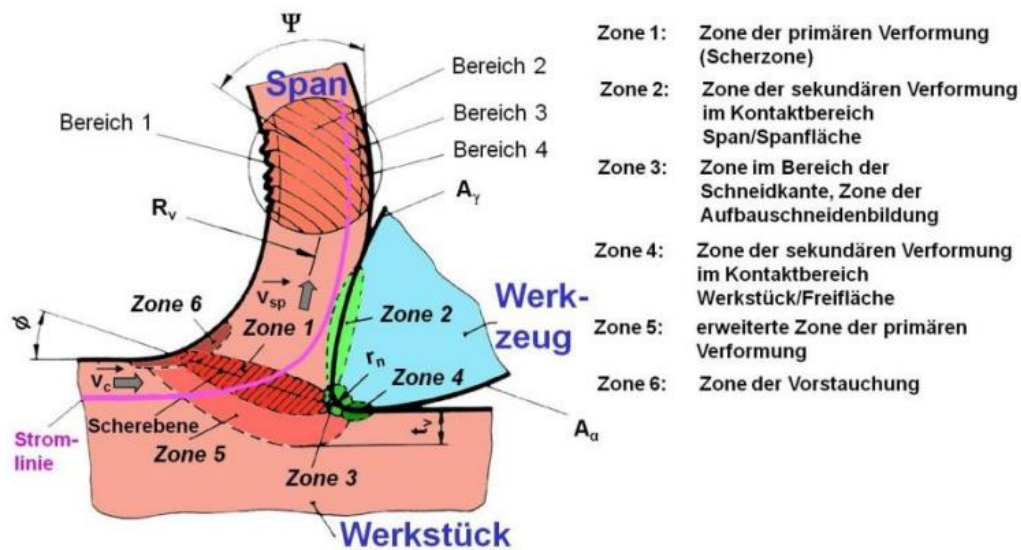


Abbildung 4 :- Zone Verteilung in Trennen [5]

Bei diesem Prozess gibt es insgesamt 6 Verformungszonen, die in Abbildung 4 dargestellt sind. Zone 1 wird als Scherzone (Verformung und Spanbildung) bezeichnet. In Zone 2 und 3 entsteht Verformungswärme. Diese Zonen werden als sekundäre Verformungszonen bezeichnet. In Zone 4 kommt die Oberflächengrenzschicht des Werkstücks, die durch Trennverfahren mechanisch und thermisch beansprucht wird und für das Gefüge, die Oberflächenverfestigung und Oberflächeneigenspannungen verantwortlich ist [4,5,6].

2.2 Kunststoffe und Hochwarmfeste Werkstoffe

Die Zerspanbarkeit ist eine Eigenschaft eines Werkstoffs, die unter gegebenen Bedingungen eine spanende Bearbeitung zulässt [33]. Jedoch lässt es sich nicht mit einer einzigen Definition erklären, da verschiedene Faktoren wie Schnittbedingungen, Schnittkraft, Schneidflüssigkeit und die Oberflächengüte des Werkstückes für praktische Anwendungen berücksichtigt werden müssen [33]. Die Bearbeitung von Teilen mit einer Härte über 45HRC wird als Hartbearbeitung bezeichnet und umfasst die Bearbeitung von Werkstoffen wie gehärtete legierte Stähle, Titanlegierungen, nitriertes Eisen, Einsatzstähle, Superlegierungen, hartchrombeschichtete Stähle, Nickelbasislegierungen usw. [11].

Titan bzw. Titanlegierungen haben einige besondere Eigenschaften, die es sehr wertvoll machen. Es hat eine niedrige Dichte bei hoher Festigkeit. Titan hat die höchste

spezifische Festigkeit unter den metallischen Werkstoffen [34]. Es ist auch resistent gegen wässrige Korrosion. Es ist eines der teuersten Materialien auf dem Markt [34]. Man verwendet es auch zur Herstellung von Superlegierungen, die aufgrund ihrer geringen Dichte, hohen Zugfestigkeit und guten Korrosionsbeständigkeit zur Herstellung von Motoren- und Turbinenkomponenten verwendet werden, sowie zur Herstellung von Raumfahrtmotoren, Raketenblechen und -folien. Aufgrund seiner guten Korrosionsbeständigkeit wird es auch beim Schiffsbau verwendet. Titanlegierungen können auch in der Medizintechnik z.B. für Knieprothesen verwendet werden und sind sowohl für Anwendungen bei höheren als auch bei niedrigeren Temperaturen geeignet [11,35,20].

Nickel hat auch eine hohe Warmfestigkeit, einen sehr hohen Widerstand gegen Hochtemperaturkorrosion, eine gute Duktilität und es gibt die Möglichkeit der Fertigung komplexer Geometrien [34]. Nickel wird in hohem Maße bei der Herstellung von rostfreiem Stahl, Batterien, legierten Stählen, bei der Plattierung und bei der Herstellung von Nichteisenlegierungen verwendet. Die Bearbeitung von hochwarmfesten Werkstoffen wie Titan ist schwierig aufgrund der hohen Festigkeit, der geringen Wärmeleitfähigkeit, der hohen chemischen Reaktivität, des geringen Elastizitätsmoduls und der gleichzeitig geringen Bruchdehnung. Titan reagiert durch die hohe Reaktivität mit dem Werkzeug schneide. Durch übermäßige Belastung und Entlastung des Werkzeugs kommt es zu hohem Werkzeugverschleiß, hohen Spannungen, Maßungenauigkeiten, verminderter Oberflächenqualität, dem Verschweißen und Verklemmen der Späne und Vibrationen im Prozess [11,35,20].

Kunststoffe wie PEEK, auch bekannt als Polyetheretherketon, sind amorphe oder teilkristalline Kunststoffe, zäh und abriebfest bis max. 250° C und mit hoher Festigkeit bis 145° C. Mit diesen Eigenschaften ist es in den Bereichen der Automotive, Luft- und Raumfahrt, Elektronik und Medizin weit verbreitet [37] Infolge seiner Verschleiß-, Wärme- und Chemikalienbeständigkeit wird es für die Herstellung von zahnmedizinischen Instrumenten, Dialysatoren und Endoskopen verwendet, und aus Kostengründen für die Herstellung von Flugzeugaußenteilen, Innenteilen und kritischen Motorteilen in der Luft- und Raumfahrt [E,37].

Für die Herstellung von Zahnimplantaten und medizinischen Instrumenten sind hohe Reinheitsstandards erforderlich, die eine Bearbeitung mit geringer

Schnittgeschwindigkeit erfordern. Die Verarbeitung sollte ohne Kühlschmierstoff (KSS) erfolgen, weil dieser zu einer Kontamination führen kann [1].

Gehärteter Stahl ist weit verbreitet in allen Branchen durch die Qualität der Verschleißfestigkeit, Dauerhaftigkeit, Verschleißfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit. Es ist ein Carbon-Stahl, der einem Wärmebehandlungsprozess unterzogen wurde. Er wird verwendet, um Stahl-Kugeln, Düsen, Instrumente, LKW-Betten, Crusher und Messer zu fertigen. Außerdem kann er auch in besonders sauren Umgebungen genutzt werden.

2.3 Kühlschmierstoffe

Bei der Diskussion über Fertigungstechnik kann das Thema Kühlschmierstoffe (KSS) nicht ausgespart werden. Kühlschmierstoffe (KSS) sind ein wichtiger Teil der Zerspan Technik. Es gibt drei Hauptaufgaben von KSS, Kühlen, Schmieren und Spülen. Es soll den Prozess durch Wärmeabfuhr und Benetzung kühlen und eine Schmierung durch Schichtbildung und Kriechen erzeugen. Auch der Spülung der Späne ist sehr wichtig. Die Abfuhr der Prozesswärme zwischen Werkzeug und Werkstück ist für die Reduzierung von Werkzeugverschleiß und Reibung sehr wertvoll [3,8].

Kuschmierstoffe werden in nichtwassermischbare, wassermischbare und wassergemischte nach DIN 51385 klassifiziert. Die wassergemischten Kuschmierstoffe werden mit Wasser verdünnt und ergeben eine Emulsion [8]. Nichtwassermischbare Kuschmierstoffe sind wasserunlösliche Schmierstoffe, die einen dünnen Film zwischen Werkzeug und Werkstück bilden, um die Reibung zu verringern. Hauptsächlich werden Mineralöle als nicht wassermischbare Kuschmierstoffe verwendet. Wassermischbare Kuschmierstoffe sind Schmierstoffe, die mit Wasser mischbar sind und wegen der Höhere Wärmekapazität und thermische Leitfähigkeit effektiver kühlen kann [8,9]. Die Verwendung von Kuschmiermitteln im Bearbeitungsprozess erhöht die Standzeit des Werkzeugs, reduziert die thermische Ausdehnung des Werkstücks, verringert die Wärmebelastung der Werkzeugmaschine und erhöht die Oberflächenqualität des Werkstücks [16].

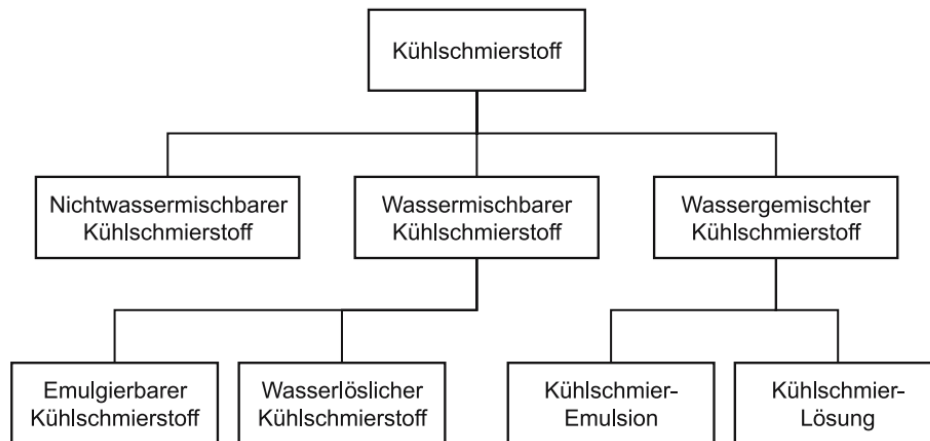


Abbildung 5 :- Klassifizierung der Kühlschmierstoffe [8]

Additive sind synthetische Komponenten, die verwendet werden, um die Eigenschaften von Kühlschmierstoffen zu verbessern. EP-Additive werden verwendet, um eine bessere Schmierwirkung unter hohen Temperaturen und Druck zu erzielen. Biozide werden zum Schutz vor Mikroorganismen eingesetzt [9]. Es gibt auch Additive zum Korrosionsschutz. Diese Additive werden als Korrosionsinhibitoren bezeichnet und bilden eine Schutzschicht auf dem behandelten Werkstück, die es gegen Wasser und Luft schützt [9]. Auch bei KSS gibt es das Problem des Aufschäumens, wodurch die Schmierwirkung von Kühlschmierstoffen verringert wird. Um das Schäumen zu verhindern, werden Schauminhibitoren eingesetzt. Höhere Fettalkohole und Silikonöle können als Schauminhibitoren benutzt werden [9].

2.4 Ansatz für Kühlschmierstoffe

Kühlschmierstoffe können entsprechend ihrer Anwendungen in 3 Kategorien eingeteilt werden: Nassbearbeitung, Reduzierte Schmierung, Ohne Schmierung, deren Einteilung in der folgenden Abbildung zu sehen ist [16].

Schmierungsart	Bezeichnung	Verwendete Meng
Nassbearbeitung	Überflutung, Vollstrahlschmierung	10 bis 100l/min
Reduzierte Schmierung	Mindermengenschmierung (MMS)	50 ml/h bis 1–2 l/h
	Minimalmengen-Kühlschmierung (MMKS)	< 50 ml/h
Ohne Schmierung	Trockenbearbeitung	Keine

Abbildung 6 :-Arten der Schmierung [16]

2.4.1 Nassbearbeitung

Nassbearbeitung, auch Überflutung oder Vollstrahlschmierung bezeichnet, ist ein konventionelles Konzept der Schmierung, das seit vielen Jahren in der Industrie eingesetzt wird. Wasser übernimmt die Kühlung durch höhere spezifische Wärmekapazität und auch höhere Wärmeleitfähigkeit. Öl wird zur Reibungsreduzierung eingesetzt, wobei je nach Anforderung des Bearbeitungsverfahrens verschiedene Kombinationen von Schmiermitteln wie Emulsion oder Öl zu sehen sind. Mineralöle haben dabei in der Regel einen Anteil von 5 – 7 % [16]. In diesem Fall wird je nach Verfahren ein Schmiermittel zwischen 10 und 100 l/min verwendet [2]. Schmiermittel läuft ständig im System durch Pumpen. Das ist eine wartungsintensive Tätigkeit. Außerdem sind diese Komponenten kostenintensiv und auch kostspielig in der Wartung, so dass das Endprodukt verteuert wird. Die Innenkühlung ist bei dieser Art der Kühlung schwierig, insbesondere bei Tiefbohrungen und Bohrungen mit kleinem Durchmesser [2,16]. Die Haupteinschränkung der Nassbearbeitung ist die Entsorgung von Kühlschmierstoffen, die ungenügende Nutzung des gesamten Schmierstoffpotenzials, die Wartungskosten, die Filterkosten, die Kosten für die Rückkühlung, usw. Es wurden Entwicklungen zur Verbesserung dieser Art der Kühlung durchgeführt [2].

Diese beinhalten Hochdruck-Kühlung mit bis zu 150 bar KSS-Druck [D], welche es ermöglichen, die Innenkühlung in Bohrungen und auch in der Dreharbeit zu erreichen. Das führt zu einem besseren Spanbruch. Es gibt auch spezielle Düsen mit Zerspanungswerkzeugen auf dem heutigen Markt, die direkt auf die Schneidzone gerichtet sind. Mit dieser Art von Werkzeugen wird die Kontaktzeit zwischen Werkstück und Werkzeug reduziert, die Schnittkraft vermindert und eine bessere Spankontrolle und damit Prozessstabilisierung ermöglicht [D]. Mit diesem Fortschritt kann die Verschwendung von Schmiermittel reduziert werden. Aber für diese Art von Hochdruck sind leistungsstarke Pumpen erforderlich, die wiederum die Produktionskosten erhöhen.

2.4.2 Trockenbearbeitung

Die Bearbeitung ohne Schmiermittel wird als Trockenbearbeitung bezeichnet. Dies reduziert die Kosten der Bearbeitung um 17 %, weil Schmiermittel und die damit verbundenen Kosten vollständig eliminiert werden [16]. Trockenbearbeitung ist nur bei niedrigen Schnittgeschwindigkeiten möglich und stößt bei Hochleistungswerkstoffen wie Titan an seine Grenzen. Auch die Prozesssicherheit ist eingeschränkt, geringere Produktivität, Werkzeugverschleiß, starke Aufheizung vom Werkzeug und Werkstück und Qualitätsminderung tritt auf. Nach BGI/GUV-I 718 E zählt es als Trockenbearbeitung, wenn weniger als 2 % Schmiermittel auf den Spänen oder 80 ml Kühlschmierstoff pro Stunde in einem Bearbeitungsverfahren genutzt werden [14].

2.4.3 Minimalmengenschmierung

MMS " Minimalmengenschmierung ", auch bekannt als MQL "Minimum Quantity Lubrication" auf Englisch. Es wurde speziell entwickelt, um die Grenzen der Nassbearbeitung und der Trockenbearbeitung zu überwinden. Als MMS bezeichnet man die Schmierung und Kühlung von Bearbeitungsvorgängen mit minimalen Mengen an Kühlschmierstoff, wobei pro Bearbeitungsstunde und Werkzeug maximal 50ml Schmierstoff verbraucht werden. Allerdings kann das Verfahren bei einigen Bearbeitungen kurzzeitig mehr als 150 ml/h erfordern, etwa bei Werkzeugen mit einem Durchmesser von mehr als 40 mm [14,16,2]. Bei MMS entstehen nur sehr wenige oder keine Restschmiermittel, so dass die Kosten für die Rückkühlung und die Aufbereitung des Schmiermittels drastisch sinken.

2.4.4 Kryogene Kühlung

Zum Verständnis des Begriffs "kryogene Kühlung" ist es wichtig, den Begriff ‚**Kryogen**‘ zu verstehen. Heike Kamerlingh Onnes hat entdeckt, dass Gase auch verflüssigt werden können und er war der erste, der flüssige Helium hergestellt hat. Das Wort "Kryogene" setzt sich aus den beiden Wörtern κρύος für "kalt" (griechisch) (englisch: Frost, Ice) und (lateinisch)generare für "erzeugen" (englisch: create) zusammen. Laut NIST arbeiten Kryogene mit sehr tiefen Temperaturen. Kryogene Gase sind Gase, die durch Kompression oder Kühlung verflüssigt werden [17]. Kryogene Gase werden in der Medizin und in der Technik eingesetzt, aber hauptsächlich in der

Zerspanungsindustrie wird LN_2 und CO_2 verwendet, weil es kostengünstig ist und Sicherheitsmaßnahmen erfüllt [19]. CO_2 wirkt nach dem Joule-Thomson-Effekt, d.h. es dehnt sich aus und kühlt ab, wenn CO_2 aus dem Schmierstoffkanal außerhalb des Werkzeugs austritt [21].

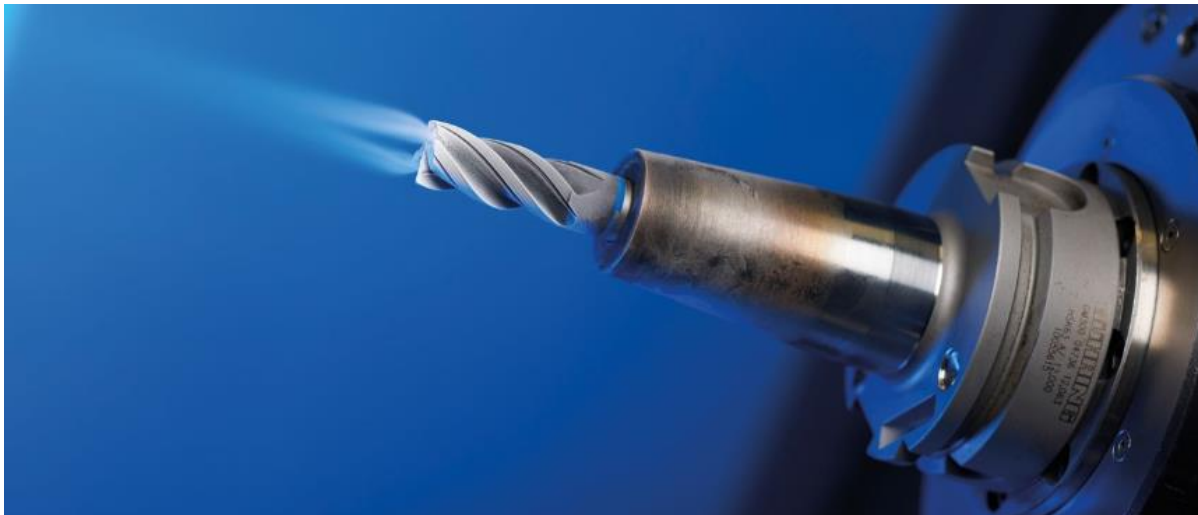


Abbildung 7 :- Kryogene Fräsen[K]

Kryogene Kühlung ist ein Ersatz für die konventionellen Kühlschmierstoffstrategien. Bei dieser Art von Ansatz werden hauptsächlich LN_2 und CO_2 für Kühlung verwendet. LN_2 ist schwer zu behandeln, weil die Temperatur bereits bei -196°C liegt und eine Isolierung des Werkzeugs erforderlich ist, außerdem kann es nicht mit Öl gemischt werden, weil dieses gefriert. Daher kann LN_2 nur über eine 2-kanalige Zuführung verwendet werden. Außerdem haben Ergebnisse gezeigt, dass Stickstoff zu einer Verhärtung der Werkzeugschneide führt und somit die Lebensdauer des Werkzeugs verringert [23]. Hingegen kann CO_2 aufgrund der Eigenschaft, bei Raumtemperatur flüssig bleiben, mit Öl gemischt werden und über eine 1-kanalige Zuführung verwendet werden. Vor der Durchführung der Experimente ist es wichtig, die Grundlagen der Kühlleistung des CO_2 zu kennen. Es gilt zwei Aspekte zu verstehen. Erstens die Wärmeübertragung zwischen der Schneidzone und dem CO_2 und zweitens die Ausdehnung des flüssigen CO_2 , die eine niedrige Phasenumwandlungstemperatur ermöglicht [46].

Es gibt zwei Konzepte: Wärme und Temperatur. Wärme ist eine Form von Energie in bewegter Form. Wärme ist keine Eigenschaft eines Systems. Die Temperatur ist eine physikalische Größe eines Objekts, die zur Bestimmung der Erwärmung des Objekts

verwendet wird. Die Temperatur wird durch die Wärme erzeugt, die während des Bearbeitungsprozesses entsteht [40].

Die Schnittzone wird als ein System betrachtet. Nach der Thermodynamik fließt die Wärme von einem System mit höherer Energie zu einem System mit niedrigerer Energie, bis das Gleichgewicht erreicht ist. Gemeinsam mit CO_2 befinden sich Schnittzone und CO_2 in einem gekoppelten System. Weil CO_2 der Schnittzone zugeleitet wird, wird ein thermisches Ungleichgewicht geschaffen und die Wärme wird von der Schnittzone auf das andere System übertragen. Hier wird die Wärmeübertragung durch zahlreiche Faktoren beeinflusst, wie z.B. die Strömungsgeschwindigkeit des Fluids, die Art der Strömung (turbulent oder laminar), die Art des Fluids und andere strömungsmechanische Variablen [46,45].

Wenn CO_2 bei 1 bar Druck (normaler atmosphärischer Druck) aus dem Werkzeug austritt, erreicht es eine Temperatur von $-78,5\text{ °C}$. CO_2 ändert seine Phase mit der Änderung des Drucks, wie in der Abbildung 8 gezeigt wird. Bei 74 bar Druck hat es eine Temperatur von 31 °C . Mit dem Druck sinkt auch die Temperatur. Beim Druck von 5,18 bar beträgt die Temperatur $-56,6\text{ °C}$. An diesem Punkt beginnt CO_2 seine Phase von flüssig zu fest zu ändern [47,45].

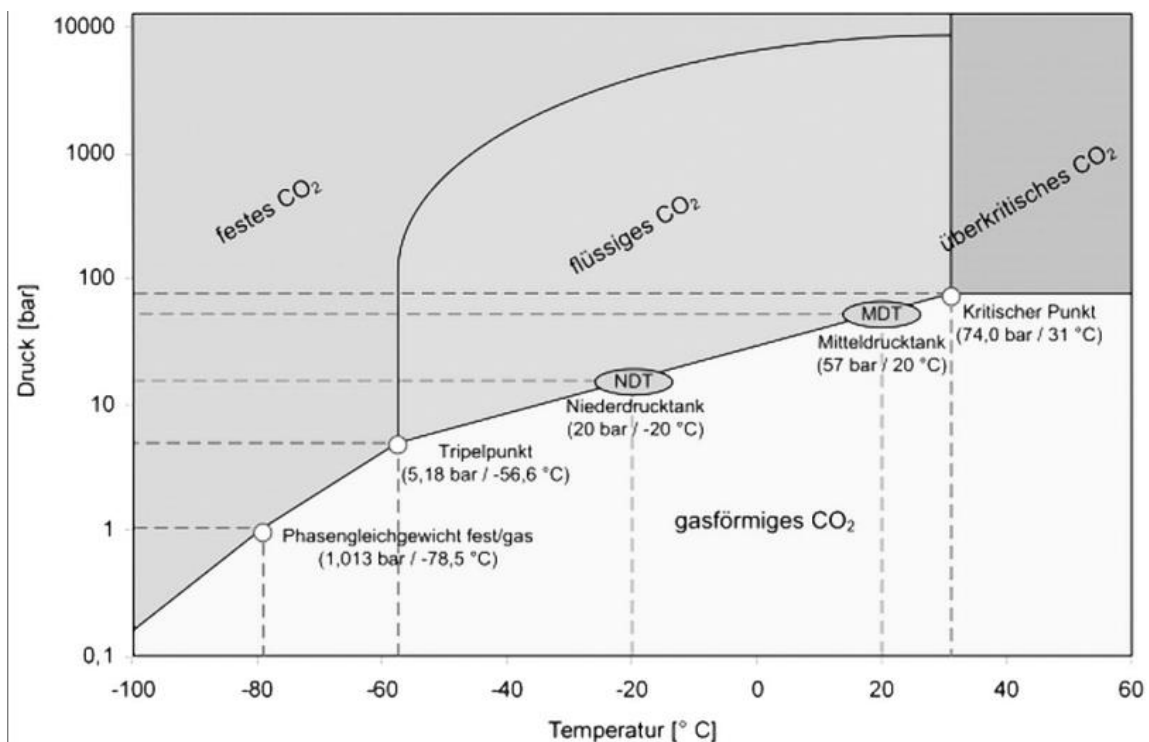


Abbildung 8 :-Phasendiagramm [45]

Bei einem Phasenübergang kommt es in der Regel zu einer sprunghaften Vergrößerung oder Verkleinerung des Volumens. 1 Kilogramm flüssiges Kohlendioxid bei 60 bar Druck mit einer Dichte von $784,97 \text{ kg/m}^3$ hat ein Volumen von 1,274 l, das Volumen vergrößert sich nach Expansion auf Atmosphärendruck (1 bar, $20 \text{ }^\circ\text{C}$) um das 432-fache auf 550,87 l gasförmiges CO_2 (mit einer Dichte von $1,8153 \text{ kg/m}^3$) [44,45,46,47]. Entsprechend der Gesetze der Thermodynamik erfordert der Phasenwechsel von fest zu flüssig, flüssig zu gasförmig oder fest zu gasförmig Energie, um die Bindungen zwischen den Atomen aufzubrechen und die Anziehungskraft zu überwinden. Bei umgekehrten Übergängen wie Erstarrung, Kondensation und Reformierung wird Energie freigesetzt [46].

Beim Schmelzen, Verdampfen und Sublimieren führt die Wärmeaufnahme zur Abkühlung des Prozesses. Beim Prozess der Abkühlung mit CO_2 tritt zuerst CO_2 in flüssiger Form aus und gefriert als Feststoff unter Freisetzung von Energie von $-8,33 \text{ KJ/mol}$. Von der festen Form sublimiert das CO_2 in den gasförmigen Zustand, dabei wird Energie von $+25,25 \text{ KJ/mol}$ benötigt. Das bedeutet, dass 1 Mol CO_2 vom flüssigen zum festen Zustand und dann vom festem zum gasförmigen Zustand eine Energie von $+16,92 \text{ KJ/mol}$ benötigt. Diese Energie wird aus der Umgebung entnommen und erzeugt einen Kühlungseffekt [44]. Der Hauptvorteil der kryogenen Kühlung besteht in der Realisierung der Trockenbearbeitung, der Verringerung des Werkzeugverschleißes durch thermische und mechanische Beanspruchung bei der Trockenbearbeitung, der Erhöhung der Werkzeugstandzeit und der Steigerung der Produktivität [21]. Es reduziert die chemische Reaktivität des Werkstückmaterials mit dem Werkzeug und erhöht die Werkzeughärte. Es reduziert auch die Temperatur der Schneidzone und verbessert die Oberflächengüte [18]. Außerdem ist es ein rückstandsfreies Kühlverfahren, womit Probleme wie Filterung, Ruckkühlung des Kühlschmierstoffs entfallen.

2.4.5 MMS + Kryo

MMS + Kryo ist die Kombination von Minimalmengenschmierung und Kryogene, wobei durch die Kombination dieser beiden KSS-Strategien, Kühlen, Schmieren und Spülen, alle drei erreicht werden können [20]. Der Flankenverschleiß durch kMMS war 9 % besser als die Nassbearbeitung [24]. Auch kann ein signifikanter positiver Einfluss auf

die Oberflächengüte festgestellt werden [24]. Eine deutliche Erhöhung der Werkzeugstandzeit kann bei MMS + Kryo gegenüber MMS beobachtet werden [26].

	Kühlen	Schmieren	Spülen	Weitere
■ Einteilung nach Menge des KSS				
■ Überflutungsschmierung	XX	XX	XX	
■ Minimalmengenschmierung	-	X	-	
■ Trockenbearbeitung	-	-	-	
■ Weitere Varianten:				
■ Druckluftkühlung	X		XX	
■ Kryogene Kühlung	XXX	-	X	(Kaltversprödung)
■ Hochdruckkühlung	X	X	X	Spanbruch
■ Kombinationen				
■ MMS +Kryo	XXX	X	X	(Kaltversprödung)

Abbildung 9 :- KSS Strategien[21]

Die Ergebnisse von T. Bergs et al. bestätigen, dass eine einkanalige Zufuhr zu positiveren Ergebnissen führt, weil es kompliziert ist, ein 2-Kanal-Zufuhrsystem innerhalb des Werkzeugs mit kleinerem Durchmesser zu haben. Außerdem verringert es die Standzeit des Werkzeugs, indem das CO₂ den Weg des MMS blockiert [27]. Die Ergebnisse haben auch gezeigt, dass KMMS mit innerer Kühlmittelzufuhr die Standzeit des Werkzeugs im Vergleich zur konventionellen Bearbeitung um 106 % bis 169 % erhöht, abhängig von der MMS-Löslichkeit in CO₂ [27]. Alle KSS-Strategien haben ihre eigenen Pro- und Contras, die in der folgenden Abbildung deutlich zu erkennen sind. Durch die Kombination von 2 verschiedenen KSS-Ansätzen können die Einschränkungen überwunden werden, Z.B. MMS+Kryo [21].

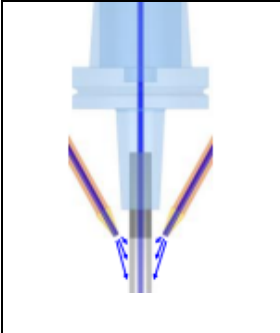
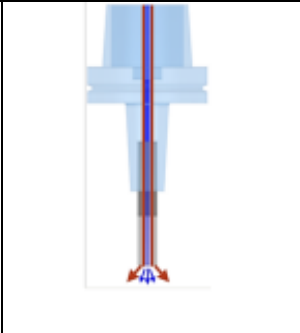
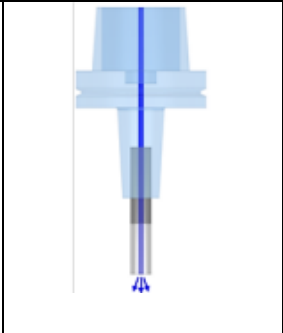
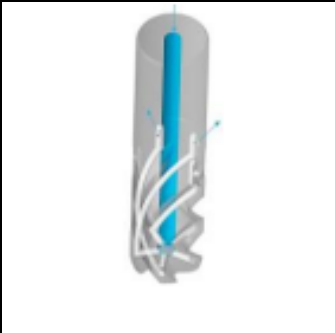
Die steigenden Anforderungen an das Material und die sich verändernden Regeln zum Schutz der Umwelt, drängt die Zerspansungsindustrie zur Senkung der Kosten und zur Steigerung der Produktivität durch die Einhaltung von hohen Qualitätsstandards. Zwischen den Beschränkungen und Problemen der Trockenbearbeitung und der Nassbearbeitung ist KMMS eine der geeignetsten Lösungen, um die industriellen Anforderungen in Hinblick auf Qualität und Kosten zu erfüllen.

2.5 Kryogene Anlagentechnik und Zuführkonzepte

In KMMS-Sprühanlagen wird ein Gas-Öl-Gemisch verwendet. In Airless-Anlagen wird der Schmierstoff in sehr kleinen Tropfen verabreicht. Durch das Aufbringen der idealen Schmierstoffmenge an die richtige Stelle wird die Entstehung von Reibungswärme verhindert oder zumindest deutlich reduziert [2,14]. Bei der Kryogene Kühlschmierung ist es aufgrund der Temperatur schwierig, mit flüssigem Stickstoff zu arbeiten. Aus technischen und wirtschaftlichen Gründen werden in der Industrie mehr Systeme für flüssiges CO₂ verwendet [21].

Es gibt hauptsächlich zwei Arten, den Kühlschmierstoff in der Metallbearbeitung aufzutragen, entweder extern oder intern. Auf dieser Basis werden verschiedene Varianten erstellt. Bei der externen Kühlschmierung wird der Kühlschmierstoff in Form von Tröpfchen auf das Werkzeug gespritzt, CO₂ und MMS beide wird an der Bearbeitungszone gesprüht.

Tabelle 1 :- KSS- Zuführkonzepte [1]

			
Externe Zuführung	Interne (Zweikanalig)	Interne (Einkanalig)	Interne(Indirekt WZ- Kühlung

Das Unternehmen „Cool Clean Technologies“ entwickelt externe Kühlsysteme, die mit einer End-box ausgestattet sind, um das CO₂ vor dem Eintritt in die Spindel zu kontrollieren. AMP ist eine Druckerhöhungsvorrichtung, die das CO₂ auf 900 PSI erhöht. Die End-box ist der wichtigste Teil dieses Systems, der die CO₂ Versorgung kontrolliert und als Rückschlagventil fungiert. Außenkühlung ist einfach zu realisieren, kostengünstig, keine Spezialwerkzeuge erforderlich. Es gibt aber Einschränkungen bei der Werkzeuglänge und Durchmesser, z.B. beim Bohren von sehr tiefen Bohrungen mit kleinem Durchmesser. Der Verbrauch von CO₂ ist hoch und eine optimale Kühlung kann nicht erreicht werden. Es gibt eine Einschränkung des direkten Zugangs zur

Bearbeitungszone, sowie mögliche Abschattungseffekte des Sprühstrahls während des Prozesses [1,20].

Aktuelle Hersteller von Systemen zur kryogenen Kühlung können der folgenden Tabelle entnommen werden. Bei der internen Kühlschmierung werden spezielle Werkzeuge mit internen Kanälen verwendet, damit der Kühlschmierstoff durch das Werkzeug fließen kann [1,14]. Bei der Innenkühlung gibt es weiterhin zwei Varianten, die einkanalige Lösung und zweikanalige Lösung. Der Ansatz einer einkanaligen Lösung verfolgt die Vermischung und Leitung über eine Spindel mit Transportgas. Die Firma „Fusion Coolant Systems“ hat diese Art von System entwickelt. Bei diesem System gibt es jedoch Einschränkungen. Es wird eine speziell modifizierte Drehdurchführung benötigt, die eine Modifizierung der Maschinenspindel erfordert [1].

Tabelle 2 :- Mischsysteme von verschiedenen Unternehmen [1,20]

Unternehmen	Herkunft	Zufuhrsystem
Cool Clean Technologies	USA	CO ₂ - Einkanallösung
Fusion Coolant Systems	USA	Überkritisches CO ₂ (> 74 bar und >31°C) – Einkanallösung
Knoll (Rother Technologies)	Deutschland	Zweikanalsystem CO ₂ und MMS
Fraunhofer Gesellschaft	Deutschland	Mischkammer

Eine optimale Kühlung wird aufgrund der Entmischung von MMS und CO₂ in dem langen Transportkanal verhindert. Außerdem sind die Kanalleitungen grundsätzlich für konventionelle Kühlschmierstoffe ausgelegt, sodass der CO₂-Verbrauch steigt. Es erfordert eine vollständige Spülung vor der Rückführung in die Emulsion, die zeitaufwendig ist. Bei der Zweikanal Lösung (Knoll (Rother Technologies)) wird ein spezielles Werkzeug mit zwei verschiedenen Kanälen für CO₂ und MMS verwendet. Aufgrund der Konstruktion als Zweikanalsystem muss zusätzlich zur Drehdurchführung eine Lanze in die Spindel integriert werden. Spezielle Werkzeughalter, die eine Zweikanal-Durchführung bis zum Werkzeughalter haben. Diese Variante ist mit einem sehr hohen Integrationsaufwand und Kosten verbunden [1]. Zudem sind nicht alle Werkzeugmaschinenspindeln mit den Integrationsstandards dieser Variante geeignet. Die Kanäle sind speziell für den Einsatz von kryogenen Kühlungen ausgelegt und ermöglichen niedrige

Verbrauchsdaten von ca. 200 – 300 g/min. CO_2 und MMS werden dem Werkzeug getrennt zugeführt und treten aus separaten Düsen aus, d.h. ohne Vermischung, um eine kryogene Kühlschmierung zu realisieren. Aufgrund des Druckunterschieds zwischen CO_2 und MMS ist die Schmierung in der Prozesszone nicht effektiv, und bei einer Änderung der Kanalgeometrie ist es nicht möglich, wieder auf eine Emulsion zurückzuschalten. Es gibt auch noch ein System, bei dem das Werkzeug indirekt gekühlt wird, mit kryogenen Medien (nicht die Bearbeitungszone). Dieses Prinzip wird in der Industrie nicht verwendet, da CO_2 nicht expandieren und ausreichend kühlen kann. Das begrenzt diesen Ansatz auf LN_2 . Außerdem können die Kühlkanäle nicht in der Nähe der Schneidkante liegen. Dies führt zu einer Schwächung der Schneidkanten [1].

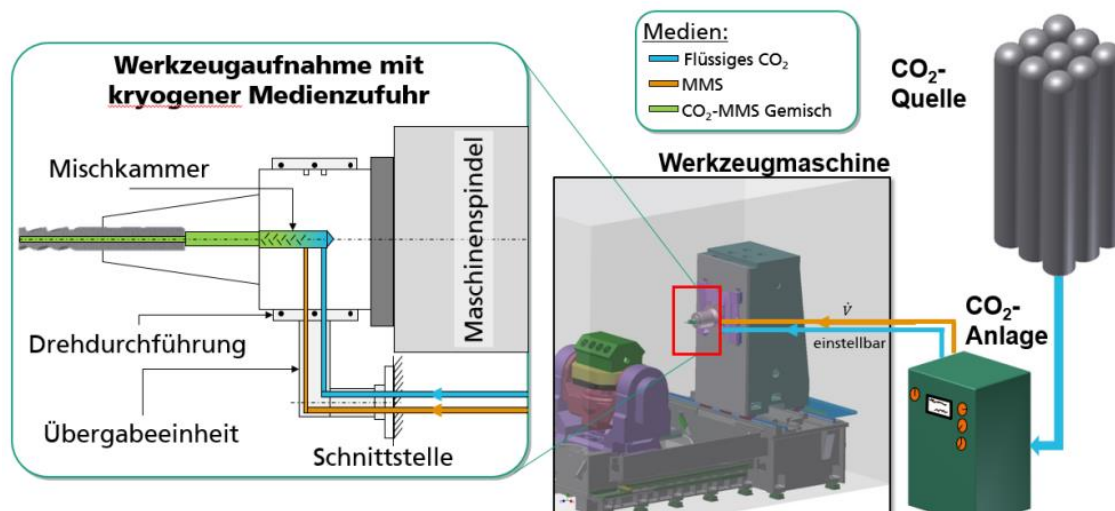


Abbildung 10 :- CO_2 Kühl-Schmiersystem [1]

Das Fraunhofer IWU eliminiert die Änderung der Maschinenspindel durch Integration der Funktion in einen Werkzeughalter. Die konventionelle Emulsionskühlung kann durch den Wechsel des Werkzeughalters erfolgen. Die Kanäle werden speziell für das kryogene Medium und das Mikrodosiersystem erstellt. Dadurch werden die Kosten verringert, die Kühlung ist effektiver und es gibt einen geringeren Verbrauch an CO_2 . Für die Kombination von CO_2 und MMS wird eine spezielle Mischkammer verwendet. Die Mischkammer ermöglicht eine einfache und flexible Umrüstung. Innenkühlung ist optimal für die Kühlung. Das führt zu keiner Kühlmittelverschwendung, erhöht aber die Investitionskosten, die benötigten Spezialwerkzeuge und Maschinen für diese Kühlung [1,20].

2.6 Grundlagen des Kryogenen FräSENS

FräSEN ist ein geometrisch bestimmtes spanabhebendes Fertigungsverfahren, erzeugt eine beliebige Werkstückoberfläche, indem ein Werkzeug mit vielen Zähnen in einer kreisförmigen Bewegung rotiert. Die Schnittbewegung wird in parallel oder schräg Richtung zur Drehachse des Werkzeugs [3,8]. In der Norm DIN 8589-3 ist das FräSEN in das Plan, Rund, Wälz, Form und ProfilfräSEN eingeteilt. Diese Klassifizierung wird unter Berücksichtigung der Kinematik und des Profils des Werkzeugs erstellt.[8] Nach dem Vorschub und der Schnittbewegung wird das FräSEN in 2 Arten unterteilt: GleichlaufräSEN und GegenlaufräSEN [8]. Beim GleichlaufräSEN bewegt sich das Werkstück an der Kontaktstelle zwischen Werkzeug und Werkstück in die gleiche Richtung wie das FräSWerkzeug rotiert. Beim GegenlaufräSEN wird das Werkstück entgegen der Richtung bewegt, in die sich das FräSWerkzeug am Kontaktpunkt dreht [9].

Auch Kühlmittel haben eine begrenzte Leistung mit Hochleistungsmaterial. Um all diese Nachteile zu überwinden, wird als Kühlschmierstoff ein kryogenes Medium wie CO_2 oder LN_2 verwendet. Es ist bekannt als **Kryogenes FräSEN** [21,18]. In der Kohlendioxid-Kühlung wird die Temperatur bei $15\text{ }^\circ\text{C}$ und der Druck bei 60 bar eingehalten. Kryogene FräSEN verwenden ein spezielles Werkzeug mit innerer Kühlung, so dass das CO_2 durch das Werkzeug fließt und sich ausdehnt und in der Atmosphäre auf $-78,5\text{ }^\circ\text{C}$ abkühlt. Dieser Effekt wird Joule-Thomson-Effekt genannt [21]. LN_2 wird auch als kryogenes Medium verwendet, aber es hat bereits eine Temperatur von $-196\text{ }^\circ\text{C}$, bevor es sich in die Atmosphäre ausdehnt. Daher ist die

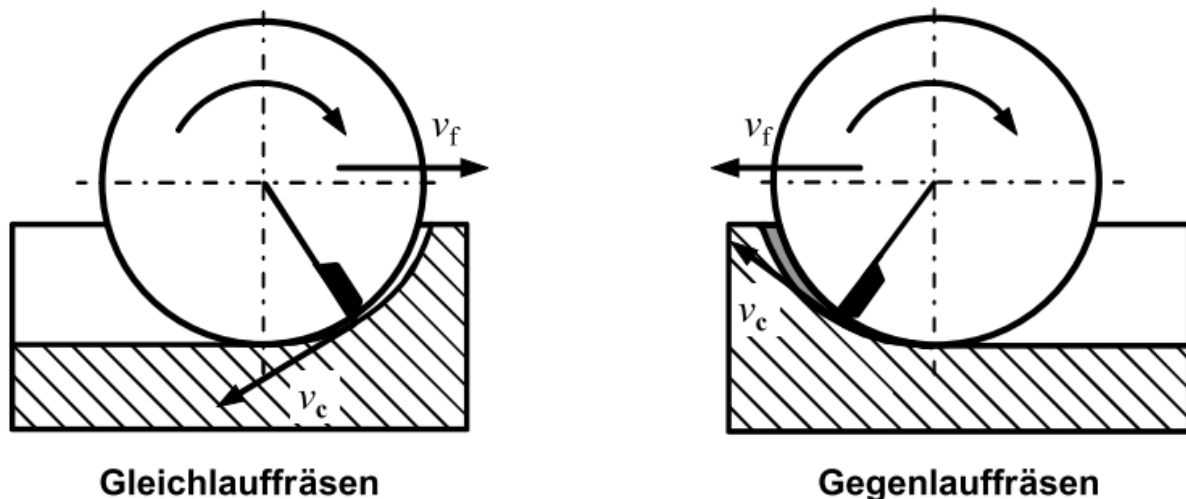


Abbildung 11 :- FräSEN Typen [8]

Isolierung der Zuleitung und des Werkzeugs notwendig [21,18,22]. Die Kryogene Kühlung steigert die Produktivität, verringert den Werkzeugverschleiß während der Bearbeitung und reduziert die Kontamination von Werkstück und Werkzeug deutlich, erhöht die Zerspanungsleistung, verlängert die Werkzeugstandzeit und reduziert eventuell die Fertigungskosten [21].

Es ist schon lange Zeit, dass CNC-Maschinen für Fräsen verwendet werden, aber allmählich hat Kryogenic Fräsen auch mit CNC-Maschinen gestartet. Für Kryogene Fräsen, spezielle Werkzeuge mit inneren Kühlmittelkanälen verwendet werden. Hybrid-Version von Fräsen ist Kryogene Fräsen, es ist eine revolutionäre Technologie. Es ist relativ neu auf dem Markt, aber jetzt kann eine schnelle Entwicklung in diesem Prozess gesehen werden. Dazu gehört große und leistungsstarke CNC-Maschinen mit 5ME Cryogenic Bearbeitungstechnologie. Dies umfasst große und leistungsstarke CNC-Maschinen mit der 5ME Cryogenic-Bearbeitungstechnologie. Diese Technologie ermöglicht es, kryogenes Kühlmittel durch die Spindel und in das Werkzeug zu leiten, was für eine optimale Kühlung führt [B].

Auch gibt es Entwicklungen nicht nur bei der Kohlendioxid-Kühlung, sondern auch bei der Kühlung mit Flüssigstickstoff, wobei das kryogene Versorgungssystem je nach Produktionsanlage ausgelegt werden kann, d.h. jede Installationsvariante wie z.B. ein Maschinenverbund mit einem zentralen Tanksystem, eine einzelne Maschine mit individuellem Tank und Versorgung ist möglich, wobei auch für diese Technologie spezielle Werkzeuge benötigt werden. Die Entwicklung ist auch in diesem Bereich zu beobachten [F].

2.7 Einteilung der Wärme in der Zerspanspannungstechnik

Die Wärmeenergie ist die Grundlage dieser Arbeit, denn das Ziel dieser Arbeit ist es, die erforderliche Kohlendioxidmenge für eine vollständige Kühlung zu ermitteln, um herauszufinden, wie viel Kühlmittel benötigt wird, ist es sehr wichtig, die erzeugte Wärme und den Wärmefluss in Werkstück, Werkzeug und Späne zu ermitteln. In der Zerspanspannungstechnik werden etwa 97 % der mechanischen Energie in Wärmeenergie umgewandelt [11]. Die Reibungs- und Scherzone kann auch als Wärmequelle genommen werden, da der größte Teil der Wärme in Verformungszentren erzeugt wird. 80 % der Wärme wird in der primären Scherzone erzeugt, wovon 5 % an das bearbeitete Teil abgegeben werden und 75 % durch den Span abgeführt werden; am Kontakt zwischen Werkzeug und Span werden 18 % der gesamten Wärmeenergie erzeugt, und 2 % entstehen an der Schnittstelle zwischen Werkzeug und Werkstück [8].

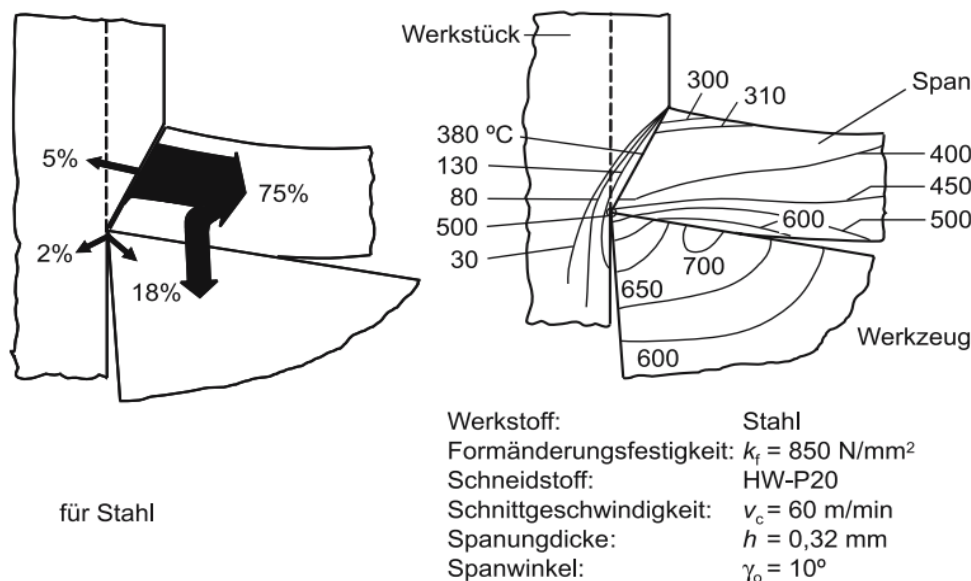


Abbildung 12 :- Einteilung der Wärme [8]

Das Werkzeug und der Span werden den höchstmöglichen Temperaturen ausgesetzt. Der Span ist für den größten Teil der Wärmeabfuhr verantwortlich. In der Spannungszone wird der größte Teil der mechanischen Energie in Wärmeenergie umgewandelt. Durch Strahlung, Konvektion und Wärmeleitung wird die Wärme in den Umgebungsraum abgeleitet. Wenn ein Schmiermittel verwendet wird, dient es zusätzlich als Leitung für die Wärmeübertragung des Prozesses [9].

3 Mathematische Modell

3.1 Teil Fertigung

In diesem Kapitel werden theoretische Berechnungen und Versuche durchgeführt, die Vorschub und Schnittkraft aus den Schnittparametern wie Drehzahl, Schnitttiefe, Schnittbreite, Mittlere Spannungsdicke, Eingriffswinkel usw. zu berechnen. Diese Kräfte werden weiter verwendet, um die Leistung während des Fräsprozesses zu ermitteln. Die ermittelte Leistung wird dann mit der spezifischen Wärmekapazität und anderen CO_2 -Kennwerten verknüpft und zur Bestimmung des Volumenstroms von CO_2 verwendet. Die Versuche waren zur Validierung des theoretischen Modells notwendig. Eine Wärme im Bearbeitungsprozess ist abhängig von den 3 Gruppen:-

- Werkstück
- Werkzeug
- Schnittbedingungen

Werkstück ist das Material, das bearbeitet werden soll. Werkstückform, Eigenschaften des Werkstücks wie Festigkeit, Dichte, Härte, Verschleißfestigkeit, Zugfestigkeit, Leit- und Warmfähigkeit usw. spielen eine wichtige Rolle bei der Warmerzeugung, Z.B. ist ein Material mit hoher Festigkeit schwer zu bearbeiten und erzeugt mehr Wärme im Prozess. Schnittbedingungen wie Schnitttiefe und Schnittgeschwindigkeit sind die wichtigsten Parameter bei der Wärmeerzeugung im Zerspanungsprozess [8,9]. Die Bestimmung der Temperatur in der Zerspanungstechnik ist komplex, die Temperatur hängt von 3 Einflussgruppen ab, die in der folgenden Tabelle dargestellt sind:

Tabelle 3 :- Einflussvariablen auf die Prozesswärme

Werkstück	Werkzeug	Schnittbedingungen
Werkstoffeigenschaften	Schneidstoff	Schnittgeschwindigkeit
Werkstücktemperatur	Schneiden Geometrie	Kühlung und Schmierung
Werkstückform	Verschleißzustand	Schnitttiefe
Spanform	Spanflächenrauheit	Vorschub

Schnitttiefe, Schnittgeschwindigkeit und Vorschub sind die drei wichtigsten Faktoren zur Bestimmung der Temperatur im Zerspanungsprozess. Diese Parameter können in der Maschine manuell eingestellt werden. Um die notwendige Leistung des

Prozesses zu bestimmen, benötigt die Kenntnis der bei der Zerspangung auftretenden Kräfte und für die Verknüpfung von Leistung und Volumenstrom des CO_2 sind Kenntnisse der Thermodynamik erforderlich. In den Unterkapiteln werden die Vorschub- und Schnittkräfte beim Fräsen berechnet.

3.1.1 Ermittlung der Schnitt- und Vorschubkraft beim Fräsen

Beim Fräsen wird hauptsächlich Wärme durch Scherkraft und Reibung zwischen Werkstück und Werkzeug erzeugt, ebenso sind Kräfte wie Schnittkraft und Vorschubkraft für die Erzeugung von Reibung verantwortlich [3]. Deshalb ist es notwendig, die Kräfte, die bei jeder Bearbeitung auftreten, möglichst genau zu kennen, um die Leistung ableiten zu können. Es wurden Werkzeuge betrachtet, die häufiger auf der Maschine eingesetzt werden. Die Bestimmung der Kräfte wird theoretisch durch Berechnungen und praktisch durch Messungen ermittelt. Das verwendete Werkzeug ist ein neues und für den Fräsprozess geeignetes Werkzeug für Schafffräser der für Stirn- sowie für Planfräsen.

3.1.2 Winkeln und Kräfte zwischen Werkstück und Werkzeug

Beim Fräsverfahren werden Kräfte und Winkel zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück erzeugt. In (Abbildung 13) ist ein Planfräser dargestellt, der ein Werkstück schneidet. Schnittrichtung und Vorschubrichtung sind in (Abbildung 13) erkennbar. Die Zerspankraft F wird nach dem Zerspankraftmodell in die Komponenten Aktivekraft F_a und Passivkraft F_p unterteilt. Die aktive Kraft ist die Komponente in der Arbeitsebene und für die Krafterzeugung verantwortlich. F_p steht senkrecht zur Arbeitsebene. Die aktive Kraft wird weiter unterteilt in Schnittkraft (in Schnittrichtung), Vorschubkraft (in Vorschubrichtung) und Wirkkraft (in Wirkrichtung) [3,8,9].

Die Schnittrichtung kann durch den Vektor der Schnittgeschwindigkeit v_c charakterisiert werden [3]. Die Vorschubrichtung ist durch den Vektor der Vorschubgeschwindigkeit v_f bekannt. Zusammen mit der Schnittbewegung ist diese Bewegung für die Spanabführung verantwortlich. Die Wirkbewegung wird durch den Vektor der Wirkgeschwindigkeit v_e charakterisiert, der sich aus der Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeit ergibt [3,8,9].

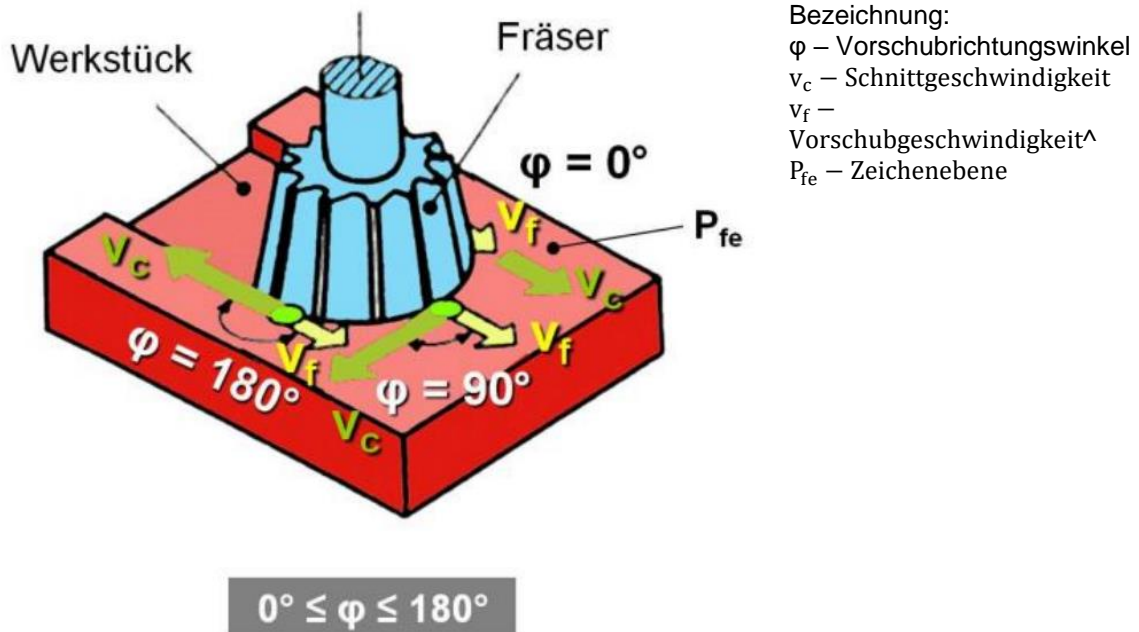
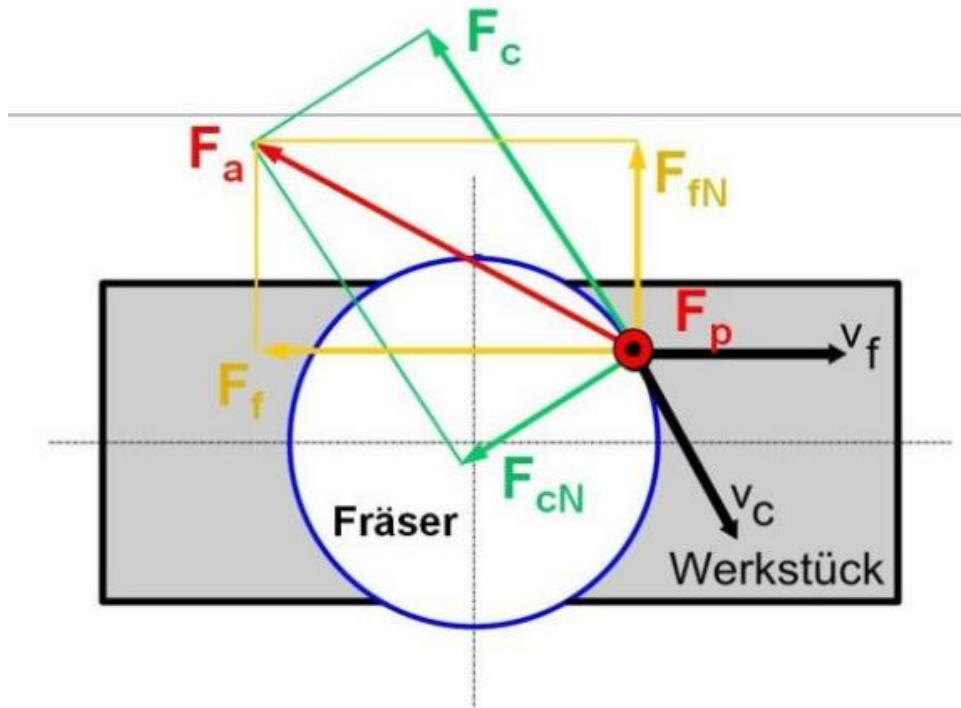


Abbildung 13 :- Winkeln, Schnitt- Vorschubrichtungen beim Fräsen [4]

Fräsen ist ein Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide, bei dem der Vorschubrichtungswinkel nicht konstant ist. Der Vorschubwinkel ist der Winkel zwischen der Vorschubrichtung und der Schnittrichtung und ändert sich beim Ein- und Austritt des Fräasers in das Werkstück von 0° bis 180° , resultierend in einer veränderten Spandicke h_m und der Spanquerschnitt A . Die Vorschubgeschwindigkeit ist die Änderung der Werkzeugposition in Vorschubrichtung pro Umdrehung [8].

Die Summe aus Schnittkraft und Vorschubkraft ist die Aktivkraft. Die Schnittkraft ist der Widerstand, den der Werkstoff dem Eindringen des Schneidwerkzeugs entgegensetzt. Die Schnittkraft hängt von Faktoren wie Materialeigenschaften, Schnittgeschwindigkeit, Form des Spanquerschnitts usw. ab [8,43]. Die Schnittkräfte sind größer als die Vorschubkräfte. Die Vorschubnormalkraft ist 90° zur Vorschubkraft. Die Bestandteile der Kraft sind in der (Abbildung 14) zu sehen:



∧ Zeichenebene = P_{fe}

Abbildung 14 :- Zerspankraft Komponenten beim Fräsen [4]

In der (Abbildung 15) sind die Drehrichtung und der Eingriffswinkel deutlich zu erkennen. Der Eingriffswinkel ist der Angriff des Werkzeugs auf das Werkstück und wird senkrecht zur Arbeitsebene gemessen. Dieser Winkel ist Eingriffswinkel.

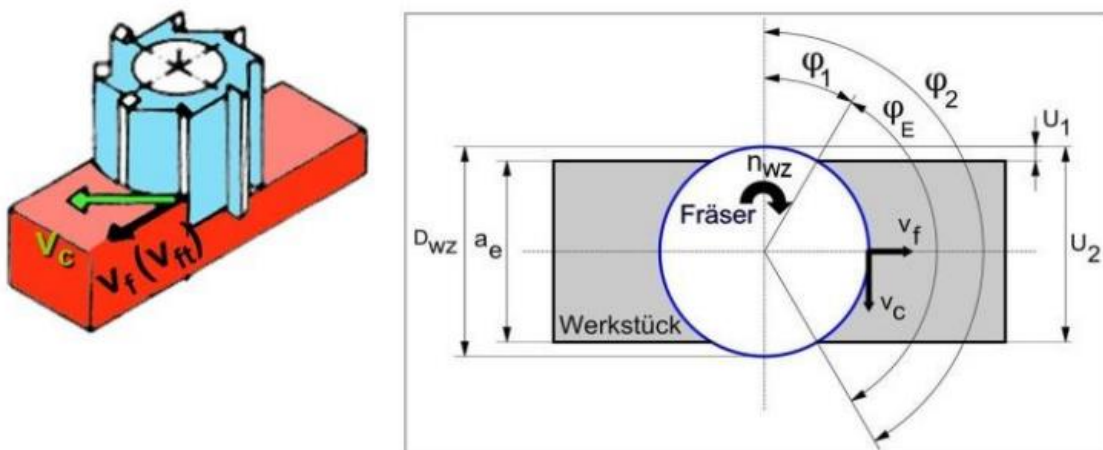


Abbildung 15 :- Kinematik beim Fräsen [4]

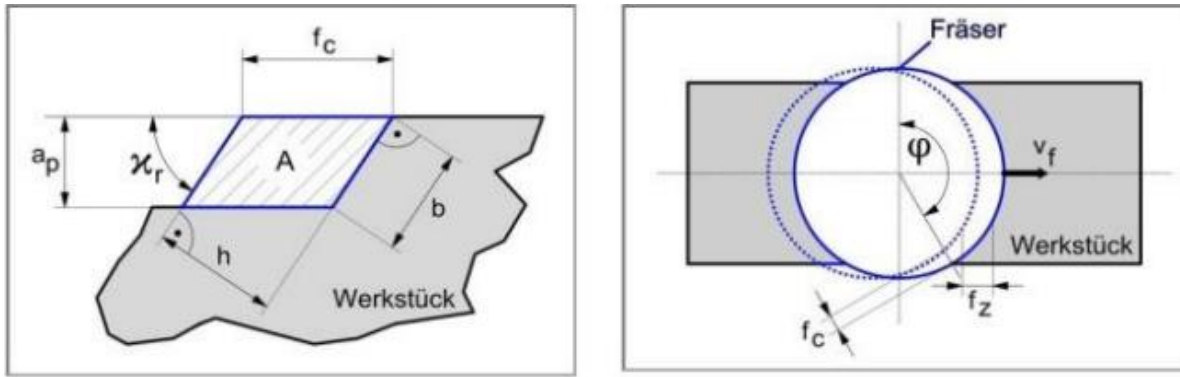


Abbildung 16 :- Werkzeugeingriff beim Fräsen [4]

In der (Abbildung 16) sind weitere Schnittgrößen zu sehen. Die Schnitttiefe ist die Tiefe des Werkzeugeingriffs und wird senkrecht zur Bearbeitungsebene gemessen. h ist die Dicke des Spanabschnitts, b ist die Spanbreite. κ_r ist der Einstellwinkel zwischen Bearbeitungsebene und Schneidebene. Es gibt auch andere Winkel wie Freiwinkel (zwischen Schneidebene und Werkzeugstirnfläche), Keilwinkel (zwischen Freifläche und Werkzeugstirnfläche), Spanwinkel (zwischen Spanfläche und Werkzeugbezugsebene). f_z ist der Vorschub pro Werkzeugzahn. Der Schnittkraftverlauf beim Fräsen ist nicht konstant [3], wie im (Abbildung 17) zu sehen [3,9]

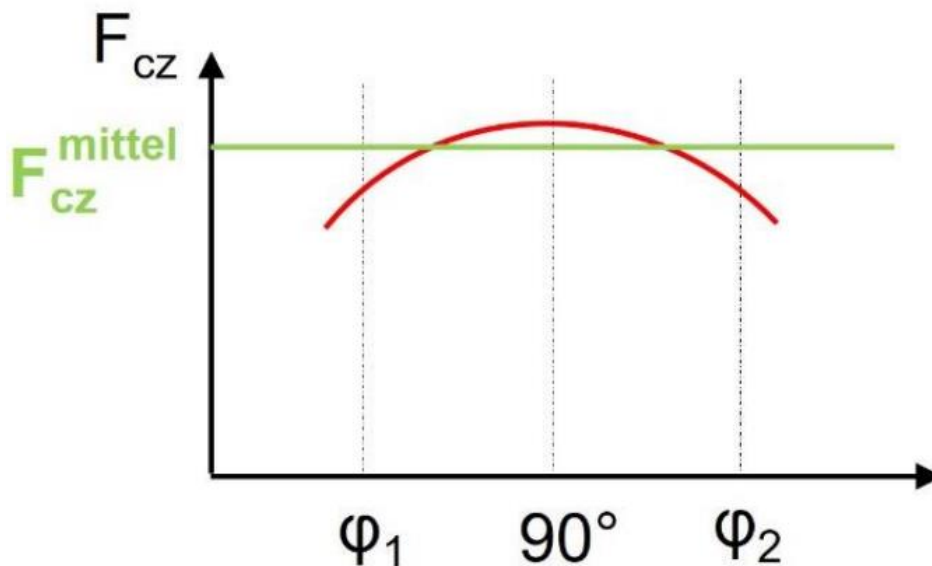


Abbildung 17 :- Schnittkraftverlauf beim Stirnfräsen[3]

φ_1 = Anschnitt; φ_2 = Ausschnitt

F_{cz} = Schnittkraft für eine Schneide

F_{cz}^{mittel} = mittlere Schnittkraft für eine Schneide

Die maximale Zerspankraft liegt bei 90° , wenn der Fräser in den Arbeitseingriff eintritt oder diesen verlässt, ist die Zerspankraft minimal, so dass zur Berechnung der Zerspankraft beim Fräsen eine mittlere Schnittkraft und eine mittlere Vorschubkraft berechnet werden.

3.1.3 Berechnung der Kräfte

Die Berechnung der Kräfte erfolgt laut [43].

Leistung kann mit Schnittkraft und Vorschubkraft berechnet werden. Zur Berechnung der Schnittkraft und Vorschubkraft benötigt man viele kleine Kenngrößen wie Schnittbreite, Schnitttiefe, Vorschub, Vorschub pro Zahn, Drehzahl. Auch Werte von Kenngrößen wie Spezifische Schnitt- Vorschubkraft und Exponent von Schnittkraft und Vorschubkraft werden aus der Tabelle berücksichtigt. Die Spezifische Schnittkraft k_{c1*1} ist eine energetische Größe, die korrekt ihrer physikalischen Bedeutung entspricht, es ist Schnittkraft für einen Querschnitt von $1\text{mm} \times 1\text{mm}$. Gleiches gilt für Spezifische Vorschubkraft. Untenstehendes Fließbild gibt eine klare Vorstellung über den Weg bis zur Leistung.

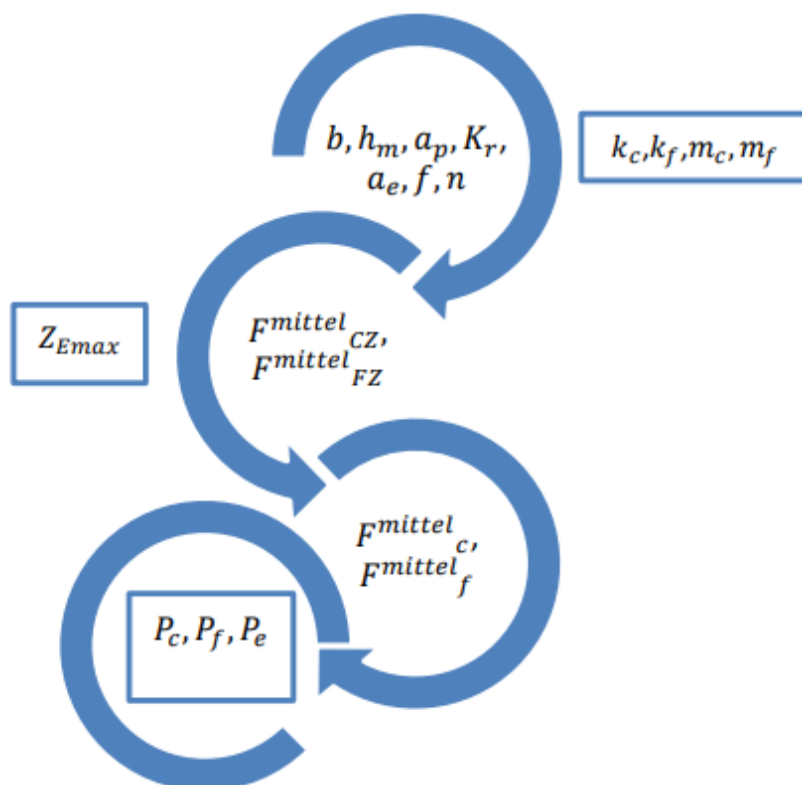


Abbildung 18 :- Flussdiagramm zur Ermittlung der Leistung

Im mathematischen Modell wurde Werkzeug mit 4 Schneiden und Durchmessern von 20 mm verwendet. Für das Experiment wird ein Stahl mit bekannter spezifischer Schnitt-Vorschubkraft und Anstiegswert berücksichtigt. Die Spannbreite kann mit Hilfe der Schnitttiefe und der Sinusfunktion des Einstellwinkels berechnet werden. Der Einstellwinkel beträgt 90° , wie im (Abbildung 19) gezeigt.

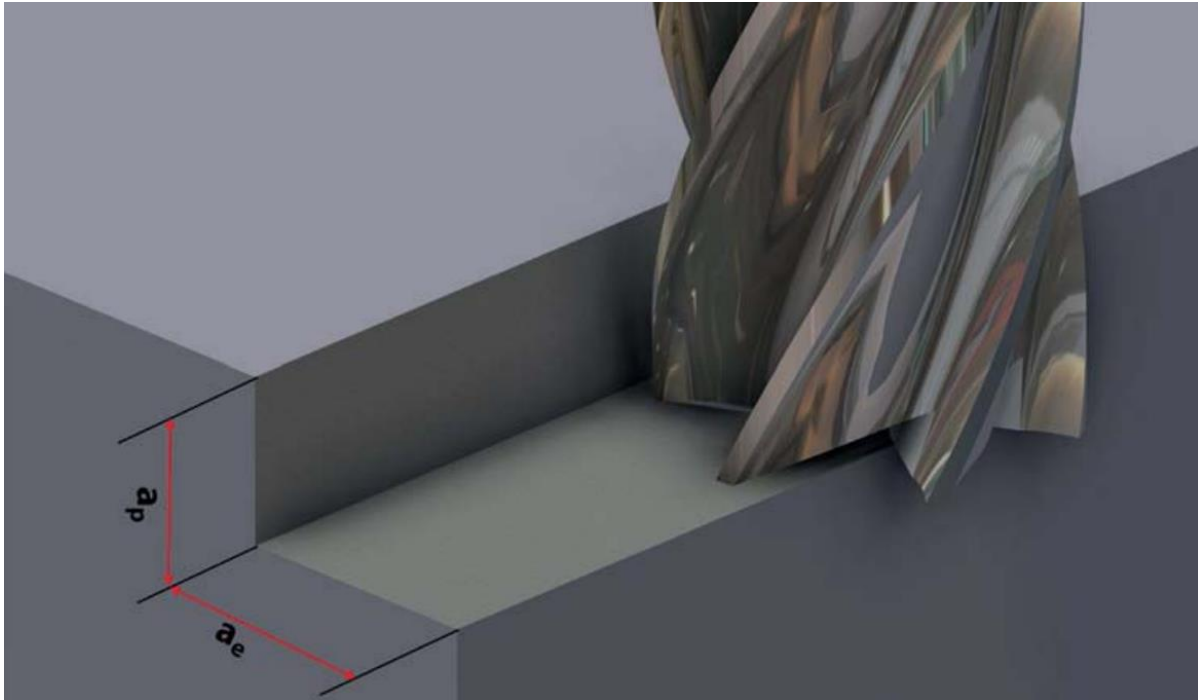


Abbildung 19 :- Darstellung von a_p , a_e und κ_r [48]

Schnittbreite wird 15 cm genommen. Praktisch wird in der Industrie kein voller Durchmesser des Fräsers verwendet, aufgrund der Grat-Entstehung. Meistens wird in der Industrie mit mehr als halbem Durchmesser gefräst, aber selten mit vollem Durchmesser, wegen der Oberflächengüte.

$$b = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \quad (1)$$

; Die Werte in Gleichung (1) einsetzen

$$b = \frac{0,5\text{mm}}{\sin(90^\circ)}$$

Die Spannungsdicke beim Fräsen ist nicht konstant. Um einen Wert für die Spannungsdicke zu ermitteln, werden als Richtwert die folgenden Formeln zur Bestimmung der mittleren Spannungsdicke verwendet.

Tabelle 4 :- Maschinenparameter

Werkstück Name	Schnitttiefe	Schnittbreite	Einstellwinkel	spannungsbreite
E295 (St 50)	0,5 mm	15 mm	$\sin(90^\circ) = 1$	0,5 mm

Wie in der Abbildung zu sehen ist, wenn ein Werkstück mit einem Werkzeug von 20 mm Durchmesser und einem Arbeitseingriff von 15 mm gefräst wird, ändert sich x aufgrund der ständigen Änderung des Vorschubrichtungswinkels, wobei der maximale Wert von x bei 90° und der minimale Wert bei 180° oder 0° liegt, wie in der (Abbildung 20) oben gezeigt.

Durch Multiplikation von $\sin\phi_0$ mit Vorschub pro Zahn, ergibt sich der Wert von x und mit diesem Wert kann dann h_{anfang} gefunden werden. Integriert man weiter h_0 mit Eingriffswinkel, kann h_m gefunden werden, Vorschub pro Zahn wird von den Herstellern angegeben, Einstellwinkel wird 90° genommen. Weitere Werte können der Tabelle entnommen werden.

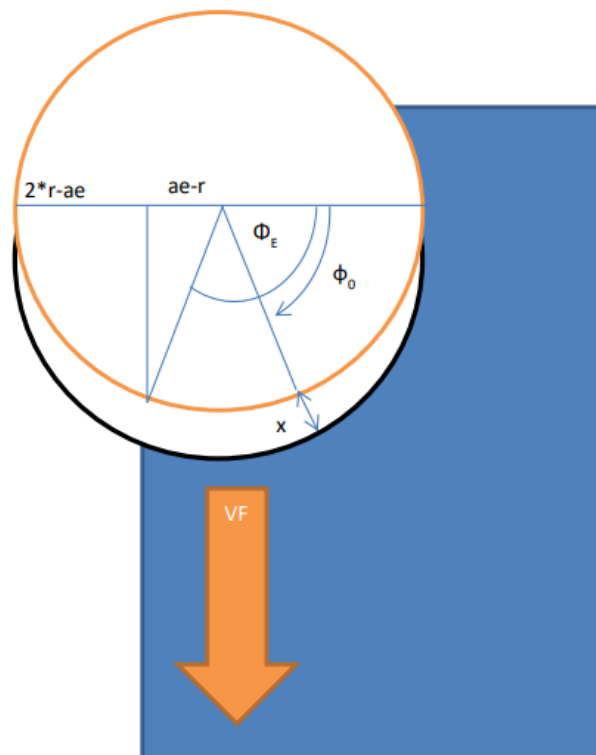


Abbildung 20 :- mittlere Spannungsdicke

$\varphi_E = \text{Eingriffswinkel}$

$$\varphi_E = 180^\circ - \left[\cos^{-1} \left(\frac{(a_e - r)}{r} \right) \right] \quad (2)$$

; Die Werte in Gleichung (2) einsetzen

$$\varphi_E = 180^\circ - \left[\cos^{-1} \left(\frac{(15 - 10)}{10} \right) \right] = 120^\circ$$

$$x = f_z \cdot \sin \varphi_0 \quad (3)$$

$$h_0 = x \cdot \sin \kappa ; \text{Initial Spannungsdicke} \quad (4)$$

$$h_m = \frac{\int h_0 d\varphi}{\varphi_E} ; \text{Integration mit Eingriffs Winkel} \quad (5)$$

Durch Einsetzen der bekannten Werte in Gleichung (3), (4), (5) ergibt sich eine mittlere Spannungsdicke h_m von 0,05038513 mm

Tabelle 5:- Schnittgrößen

κ_r	F_z	a_e	Radius	φ_E	h_m
90	0,07	15	10	120	0,05038513

Der nächste Schritt ist einer der grundlegenden und wichtigen Teile dieses Modells, weil die Kräfte für den größten Teil der Wärme im Prozess verantwortlich sind. Spezifische Schnitt- und Vorschubkräfte und Anstiegswerten werden aus der Tabelle entnommen, die unten zu betrachten ist.

Tabelle 6 :- Zerspankraft Kennwerte [3]

Stahl	Spezifische Schnittkraft k_{c1*1}	$1 - m_c$	Spezifische Vorschubkraft k_{f1*1}	$1 - m_f$
E295 (St 50)	1990	0,74	351	0,2987

Zur Berechnung der mittleren Schnitt- und Vorschubkraft pro Zahn werden die folgenden Gleichungen verwendet, wobei die entsprechenden Variablen der Tabelle entnommen werden. Die Schnitttiefe a_p beträgt 0,5 mm aus der Tabelle.

$$F_{CZ}^{mittel} = k_{c1*1} * h_m^{1-m_c} * b \tag{6}$$

;Die Werte in Gleichung (6) einsetzen

$$F_{CZ}^{mittel} = 1990 * 0,05038513^{0,74} * 0,5 = 109,025 \text{ N}$$

Die Vorschubkraft kann mit der folgenden Gleichung ermittelt werden,

$$F_{fZ}^{mittel} = k_{f1*1} * h_m^{1-m_f} * b \tag{7}$$

Der Vorschubrichtungswinkel ändert sich kontinuierlich (Abbildung 13), so dass bei einem gegebenen Punkt auch dessen Winkel berechnet wurde, und der Durchschnitt aller Winkel ergibt die gesamte Vorschubkraft im Prozess.

$$F_{fZ}^{mittel} = k_{f1*1} * h_m^{1-m_f} * b * \frac{\sum_0^{120} \sin(\varphi)}{120^\circ} \tag{8}$$

Hier, φ ist ab 0° bis 120° ;

; Die Werte in Gleichung (8) einsetzen

$$F_{fZ}^{mittel} = 351 * 0,05038513^{0,2987} * 0,5 * \frac{\sum_0^{120} \sin(\varphi)}{120^\circ} = 51,31 \text{ N}$$

Tabelle 7:- Berechnung für Schnitt – Vorschubkraft pro Zahn

$a_p(\text{mm})$	$f_z(\text{mm})$	$b(\text{mm})$	$h_m(\text{mm})$	$F_{fZ}^{mittel}(\text{N})$	$F_{CZ}^{mittel}(\text{N})$
0,3	0,07	0,3	0,0503	30,78	65,45
0,5	0,07	0,5	0,0503	51,31	109,03
1	0,07	1	0,0503	102,62	218,05
1,5	0,07	1,5	0,0503	153,94	327,08
1	0,07	1	0,0503	102	218,05
1	0,07	1	0,0503	102	218,05
1	0,047	1	0,0338	91,21	162,38
1	0,093	1	0,0669	111,72	269,07

Nachdem der Wert für die mittlere Schnitt-Vorschubkraft pro Schneide ermittelt wurde, ist es sehr wichtig, die Anzahl der Schneiden im Eingriff in Fräsen zu berücksichtigen, wofür die folgende Gleichung verwendet wird.

$$Z_{E_{\max}} = \frac{Q_E * Z}{360^\circ} = \frac{120^\circ * 4}{360^\circ} = 1,333 \text{ Schneide} \quad (9)$$

Durch Multiplikation der Anzahl der Schneide in Eingriff mit Kraft pro Zahn, ergibt sich die Mittlere Vorschub - Schnittkraft. Folgende Formeln können verwendet werden.

$$F_C^{\text{mittel}} = F_{CZ}^{\text{mittel}} * Z_{E_{\max}} \quad (10)$$

; Die Werte in Gleichung (10) einsetzen

$$F_C^{\text{mittel}} = 109,025 \text{ N} * 1,333 = 145,366 \text{ N}$$

$$F_f^{\text{mittel}} = F_{fZ}^{\text{mittel}} * Z_{E_{\max}} \quad (11)$$

; Die Werte in Gleichung (11) einsetzen

$$F_f^{\text{mittel}} = 51,31 \text{ N} * 1,333 = 68,41 \text{ N}$$

Tabelle 8 :- Berechnung für mittlere Schnitt – Vorschubkraft

F_{fZ}^{mittel} (N)	F_{CZ}^{mittel} (N)	$Z_{E_{\max}}$	F_C^{mittel}	F_f^{mittel}
30,78	65,45	1,333	87,26	41,04
51,31	109,03	1,333	145,37	68,41
102,62	218,05	1,333	290,73	136,82
153,94	327,08	1,333	436,10	205,25
102	218,05	1,333	290,73	136
102	218,05	1,333	290,73	136
91,21	162,38	1,333	216,50	121,61
111,72	269,07	1,333	358,75	148,96

Die Leistung beim Zerspanen ist das Produkt aus der Kraftkomponente und der jeweiligen Geschwindigkeitskomponente, wobei für das Experiment eine Schnittgeschwindigkeit von 100 m/min gewählt wurde und der Vorschub auf der Grundlage der vom Werkzeughersteller angegebenen Vorschubgeschwindigkeit ermittelt werden kann. Mit Hilfe der angegebenen Gleichungen können Geschwindigkeit, Vorschub und Vorschubgeschwindigkeit ermittelt werden.

$$f = f_z * Z = 0,07 \text{ mm} * 4 = 0,28 \text{ mm} \quad (12)$$

$$v_c = D * n * \pi \quad (13)$$

$$n = \frac{v_c}{D \cdot \pi} = \frac{100 \frac{\text{m}}{\text{min}}}{0,02 \cdot \pi} = 1595 \text{ min}^{-1} \quad (14)$$

$$v_f = f \cdot n = 0,28 \text{ mm} \cdot 1595 \text{ min}^{-1} = 447 \frac{\text{mm}}{\text{min}} = 0,007442085 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (15)$$

$$P_c = F_c^{\text{mittel}} \cdot v_c \quad (16)$$

; Die Werte in Gleichung (16) einsetzen

$$P_c = 145,366 \text{ N} \cdot 1,67 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 242,76 \text{ W}$$

$$P_f = F_f^{\text{mittel}} \cdot v_f \quad (17)$$

$$(18)$$

; Die Werte in Gleichung (18) einsetzen

$$P_f = 68,41 \text{ N} \cdot 0,007442085 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0,5091 \text{ W}$$

Die Wirkleistung ergibt sich aus der Summe von Schnittleistung und Vorschubleistung. Die Schnittleistung ist deutlich höher als die Vorschubleistung.

$$P_c + P_f = P_U \quad (19)$$

$$242,76 \text{ W} + 0,509 \text{ W} = 243,27 \text{ W}$$

Durch die Verwendung der gegebenen Methode sind die folgende Tabelle Leistung mit verschiedenen Schnittgrößen mit verschiedener Kombination gegeben. In allen folgenden fall, Stahl, Einstellwinkel, Eingriffswinkel, Spanungsbreite sind gleich wie oben gehalten.

Tabelle 9 :- Vorschub- Schnittleistung Berechnung

v_f (mm/min)	v_c (m/min)	F_c^{mittel} (N)	F_f^{mittel} (N)	P_c (W)	P_f (W)	P_U (W)
447	100	87,26	41,04	145,73	0,31	146,04
447	100	145,37	68,41	242,76	0,50	243,48
447	100	290,73	136,83	485,52	1,01	486,95
447	100	436,10	205,25	728,28	1,52	729,81
668	150	290,73	136	726,83	1,5	728,34
890	200	290,73	136	968,14	2,01	970,16
300	100	216,50	121,60	361,56	0,607	362,17
593	100	358,76	148,96	599,12	1,47	600,59

3.2 Teil Thermodynamik

Der Begriff Thermodynamik besteht aus den griechischen Wörtern Therme (Wärme) und Dynamics (Kraft) zusammen. Es handelt sich um die Energie und ihre Umwandlung [40]. Bei der Kryogenbearbeitung geht es um Gase, daher sollten die Eigenschaften von Gasen und die Dichte besonders beachtet werden, zuerst die Grundlagen der Definition der Dichte. Die Dichte ist die Masse eines Objekts pro Volumeneinheit und wird mit dem Symbol ρ angegeben. Die Dichte kann durch das Verhältnis von Massenstrom zu Volumenstrom ermittelt werden [40].

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{\dot{m}}{\dot{V}} \quad (20)$$

" WÄRME ist eine Wechselwirkung zwischen System und Umgebung. " – Theorem 9.1 [40]. Es wird mit einem Q bezeichnet.

$$[Q] = 1J = 1 Nm$$

Diese Gleichung verbindet den Teil Fertigung und den Teil Thermodynamik, wobei die Leistung der Fertigungstechnik auch in W berechnet wird, so dass hier der Link zur Verbindung beider Bereiche ist. Auch die Wärme kann mit folgender Formel berechnet werden: -

$$Q = mC\Delta T = \rho * V * C * \Delta T \quad (21)$$

Durch Einfügen von Volumenstrom anstatt von Volumen kann diese Formel in Wärmestrom anstatt in Wärme geändert werden. Auch die Änderung der Wärme mit der Zeit, oder der Wärmestrom, kann mit folgender Gleichung berechnet werden.

$$[\dot{Q}] = 1 \frac{J}{s} = 1 W$$

$$\dot{Q} = \rho * \dot{V} * C * \Delta T \quad (22)$$

3.3 Fertigung - Thermodynamik

P_U ist Gesamtleistung aus Schnittleistung und Vorschubleistung. Es ist in Watt gemessen. Durch Kombination der Werte für die spezifische Wärmekapazität, die Dichte und die Temperaturdifferenz von CO_2 kann der Volumenstrom für die gebrauchte Leistung ermittelt werden; folglich

$$P_C + P_f = P_U \quad (18)$$

$$\dot{Q} = \dot{m} * C * \Delta T \quad (21)$$

Wärmestrom ist 1 Joule pro Sekunde, das ist 1 Watt. $\dot{Q} = P_U$

ρ von CO_2 in $20^\circ C$ und 64 bar = $793,06 \frac{Kg}{m^3}$

C von CO_2 = $849 \frac{J}{Kg * K}$

$\Delta T = -78,33 - 20 = -98,33 K$ (Trockeneis = $-78,33^\circ C$, $20^\circ C$ für Raum Temperatur)

Der Wärmestrom kann beispielsweise für den jeweiligen Massenstrom berechnet werden; $\dot{m} = 0,037 \frac{Kg}{s}$

; Die Werte in Gleichung (21) einsetzen

$$\dot{Q} = 0,037 \frac{Kg}{s} * 849 \frac{J}{Kg * K} * 98,33 K = 3088,84 W$$

Die Negation wird aus dem Watt entfernt, weil die Negation die Kühlleistung bedeutet.

$$\dot{Q} = \dot{V} * 65972424,97 \quad (23)$$

$$P_U = \dot{V} * 65972424,97 * \eta \quad (24)$$

$$\dot{V} = \frac{P_U}{65972424,97 * \eta} \quad (25)$$

$$\eta = \frac{P_u}{\dot{Q}} \quad (26)$$

η ist der Kühlwirkungsgrad, weil 100% Kühlung ein Idealzustand ist. η ist der Wirkungsgrad der Kühlung mit Kohlendioxid, abhängig vom Volumenstrom des CO_2 und der Öffnung des Kühlkanals im Werkzeug, und sollte mit den Experimenten

ermittelt werden. Alle hier verwendeten Gleichungen sind lineare Gleichungen, aber die Wärme im Prozess weist zahlreiche Gradienten auf, aus denen die Wärme entfliehen kann. Eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst die Wärme. Die exakte Wärme kann mit dieser Formel nicht ermittelt werden, da die Wärme in der Luft, im Werkzeug, im Werkstück und in die Späne verteilt ist. Ein genauer Anteil kann nicht gefunden werden, weil die Wärme mit der Veränderung der Materialeigenschaften von Werkzeug und Werkstück schwankt. Auch die Wärme hängt von den Schnittbedingungen ab. Mit der Gleichung (24) kann die Wärme noch abgeschätzt werden, allerdings sollte klar sein, dass es sich jeweils um Abweichungen handelt.

Zur Validierung des mathematischen Modells sollten Experimente durchgeführt werden. In den folgenden Kapiteln werden verschiedene Experimente, Versuchsaufbau, Messtechnik, Ergebnisse und Validierung des Modells dargestellt.

4 Experimentelle Untersuchungen

4.1 Werkstoffeigenschaften

Dieses Verfahren ist für Titan- und Nickellegierung. Zweck dieser Arbeit ist eine grobe Abschätzung der erforderlichen CO₂ Menge im Prozess durch Berechnung der Wärmeenergie zu erhalten. Aus wirtschaftlichen Gründen und mit den verfügbaren Daten und Ressourcen wurde E295 (Baustahl) in diesem Experiment verwendet.

Tabelle 10 :- E295 Daten Blatt [L]

Klasse	E295
Nummer und Norm	1,0050, EN 10025-2
Einstufung	Unlegierter Baustahl
Chemische Zusammensetzung	Maximal- P (0,045 %), S (0,045 %), N (0,012 %)
ReH- Mindeststreckgrenze	245 MPa – 295 MPa
Rm- Zugfestigkeit	450 MPa – 610 MPa
Spezifische Wärmekapazität	470 J/Kg-K
Wärmeleitfähigkeit	53 W/mK
Dichte	7,9 g/cm ³

E295 ist ein allgemeiner Baustahl und kann in Bereichen mit Festigkeits- und Verschleißbelastungen verwendet werden, wie Konstruktionsteile zum Beispiel Spindeln, Wellen, Bolzen und auch bei der Herstellung von Stangen, Blechen, Platten, Stahlspulen, Stahlrohren, geschmiedeten und anderen Materialien. Er hat eine Zugfestigkeit von 450 MPa bis 610 MPa abhängig von der Dicke und seine Spezifische Wärmekapazität beträgt 470 J/Kg-K. Er ist im Markt leicht erhältlich[L].

4.2 Werkstoff Geometrie

Die Werkstoffgeometrie ist einer der wichtigsten Bestandteile eines Experiments. Die Hauptanforderung für dieses Experiment war eine maximale Kontaktzeit zwischen Werkstück und Werkzeug. Aufgrund der ungleichmäßigen Wärmeströme im Werkstück wurden 3 diagonale Punkte für die Thermoelemente ausgewählt, um möglichst präzise Daten (vom Eintritt des Fräasers in das Werkstück bis zum Austritt

des Fräsers aus dem Werkstück) zu erhalten, außerdem wurden die Thermoelemente möglichst nahe an der Schneidzone positioniert, um eine klare Übersicht der Temperaturen zu erhalten. Die Länge des Werkstücks sollte weder zu lang (damit der Werkstück abkühlt) noch zu kurz (damit beim Schneiden nicht genügend Wärme erzeugt wird) sein. Es wurden 2 gleiche E295-Blöcke mit den Abmessungen 120mm * 60mm * 60mm. Ein E295-Block mit den Abmessungen 120mm * 60mm * 70 mm hergestellt (Abbildung 21). 3 tiefe Bohrungen von 3 mm Durchmesser wurden angefertigt, um genau dem Durchmesser des Thermoelementes zu passen. Die Bohrungstoleranz wurde H8 gehalten, um eine Spielpassung mit den Thermoelementen zu erhalten. Die technische Zeichnung ist im Anhang zu finden.

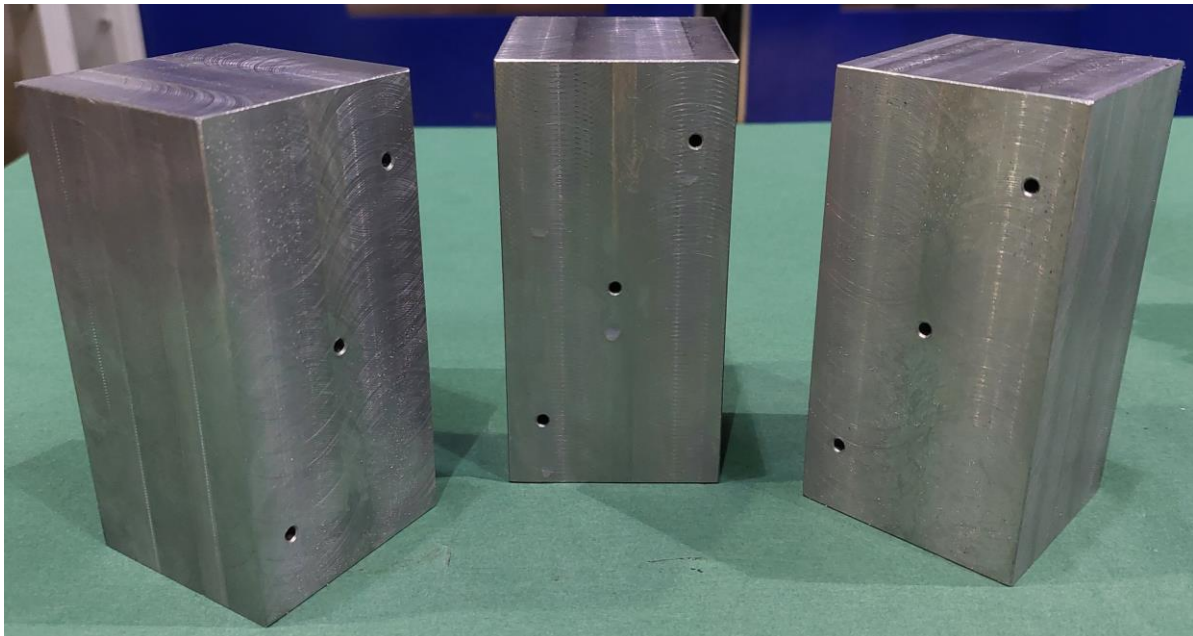


Abbildung 21 :- Werkstück

4.3 Messtechnik zur Temperaturmessung

Wärmemessung ist ein wichtiger und ein kritischste Teil eines praktischen Experiments. Die genaue Wärme in der Abtrenntechnik zu finden, ist eine schwierige Aufgabe, weil der Wärmestrom in Werkzeug, Werkstück, Späne zu schätzen ist und es sich auch um einen Prozess handelt, bei dem Werkstück durch Werkzeug geschnitten wird, und die benötigte Temperatur im Scher- und Reibbereich des Prozesses liegt. Es ist schwierig geeignete Messgeräte zu finden, die genau die Temperatur an der Stelle zwischen Werkzeugschneide und Späne in der Scherzone messen können. Die Wärme in der Zerspanungstechnik hängt von vielen Parametern

ab, wie z. B. Werkstoffeigenschaften, Werkstücktemperatur, Werkstückform, Späne Form, Schneidstoff, Schneidgeometrie, Verschleißzustand, Spanungsrauheit, Schnittgeschwindigkeit, Kühlung, Schmierung, Schnitttiefe und Vorschubgeschwindigkeit [8]. Aufgrund der Abhängigkeit von so vielen Parametern ist es schwierig, die genaue Wärme des Prozesses zu messen, aber es gibt einige Geräte, die in dieser Richtung helfen können. In diesen Versuchen werden hauptsächlich 2 Messgeräte verwendet - ein Spezialwerkzeug (Temperaturmessung an der Spitze) und ein Thermoelement.

4.3.1 Thermoelement

Das Thermoelement ist ein Sensor, der auf dem Seebeck-Effekt basiert und die Temperatur aus der Spannung bestimmt. Thomas Johann Seebeck war ein Deutscher Physiker, der den Thermoelektrischen Effekt beschrieben hat. Der Seebeck-Effekt bedeutet, dass in einem elektrischen Kreislauf, der 2 verschiedene Materialien beinhaltet, die mit unterschiedlichen Temperaturen in Kontakt stehen, eine Spannung erzeugt wird [7]. Die Thermospannungen sind fast proportional zu dem Temperaturunterschied, wenn ein großer Messbereich in die Betrachtung einbezogen wird. Die Schaltung eines Thermoelementes ist in der Abbildung rechts zu sehen [7]. Die verwendeten Thermoelemente in diesem Experiment besitzen den Messbereich von -200°C bis 600°C .

2.1.1. Spezialwerkzeug

Dieses System verwendet ein spezielles, dünnes HSK-Spannfutter, an dem elektronische Komponenten befestigt werden können. 3 Sensoren sind an 3 verschiedenen Positionen im Spannfutter montiert, um die Temperatur zu ermitteln. Für eine möglichst genaue Messung werden digitale Temperatursensoren (Abbildung 22) mit einem Bereich von -20°C bis 105°C verwendet. Zur Steuerung des Systems wird ein 8-Bit-Mikrocontroller eingesetzt. Zur drahtlosen Datenübertragung an die Empfangseinheit wird ein Transceiver im 2,4-GHz-Frequenzband verwendet [30]. Die integrierte Stromversorgung erfolgt über eine Lithium-Batterie. Dieses sensorische Spannfutter schaltet bei Vibrationen oder Rotationsbewegungen automatisch das Messsystem ein und alle 3 Sensoren messen gleichzeitig die Temperatur. Nach erfolgreichem Messdatenempfang verarbeitet die Empfangseinheit die übertragenen

Messwerte. Aus den Messwerten wird der Temperaturverlauf der Werkzeugstruktur errechnet. Anhand dieses Profils kann dann der Korrekturwert für die thermische Axialdehnung berechnet werden. Dieses Spezialwerkzeug verwendet auch zahlreiche photovoltaische Zellen (Pv), das Licht in elektrische Energie umwandeln. Eine Energiemanagementschaltung überwacht das Laden und Entladen der Batterie. Außerdem sorgt diese Schaltung für den optimalen Betriebspunkt der Pv-Zellen und für die Umwandlung aller Spannungen im System [30].

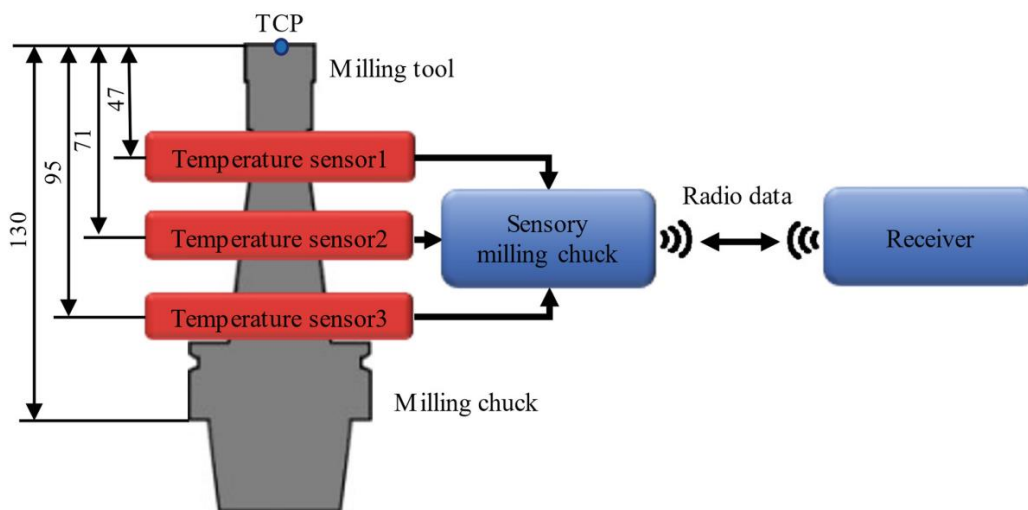


Abbildung 22 :- Das Prinzip der sensorischen Fräsfutter (in mm)

Die entwickelte Technologie kann aktuell in Labors eingesetzt werden und wurde in einer Anzahl von Fräsanwendungen getestet, unter anderem beim Fräsen von Nuten, Rillen und Taschen [30].

4.3.2 Thermokamera InfraTec VarioCAM® hr head

Tabelle 11 :- Technische Daten (Thermokamera)[M]

Bezeichnung und Hersteller	VarioCAM® hr head / InfraTec
Spektralbereich	7,5 µm ...14 µm
Temperaturmessbereich und Messgenauigkeit	-40°C ...1200°C ±1,5 K
IR- Bildfrequenz	50/60 Hz
Schutzgrad im Betrieb	IP 65, IEC 529
Abmessungen	(133 * 106 * 110)mm

Die Wärmebildkamera VarioCAM hr head (Abbildung 23) ist eine Infrarot-Thermografie Kamera vom Hersteller InfraTec. Es handelt sich um ein Thermografie System für den langwelligen Infrarot-Spektralbereich (7,5...14 μm). Das Objektiv nimmt die Objektumgebung auf ein Mikrobolometer-Array mit Pixeln(384*288) auf. Das elektrische Signal wird dann durch interne elektronische Komponenten weiterverarbeitet. Interne Elektronik dient auch zur Steuerung der Kamera, Bildpunkt Korrektur, Ansteuerung der Video- und PC-Schnittstellen. Als letztes werden die Temperaturdaten ausgegeben, wobei der Temperaturbereich von -40°C bis 1200°C reicht [M].



Abbildung 23 :- InfraTec VarioCAM hr head

4.4 CO₂ Kühlanlage

Für die experimentelle Untersuchung wurde ein kommerzielles CO₂-Kühlsystem von ChilAire (Abbildung 24) eingesetzt. Dieses besteht aus zwei Systemen: dem Kühl-/Schmierstoffsprühsystem ChilAire EI3120 und dem ChilAire Amp., einem Leistungsverstärker, um den Druck des gasförmigen Kohlendioxids zu erhöhen. Zur Ableitung des gasförmigen Kohlendioxids wurde der Mitteldrucktank verwendet, der zwölf CO₂ Flaschen von der Firma Linde enthält und auf einen Druck von etwa 57 bar eingestellt wurde. In der CO₂ Kälteanlage werden Komponenten aus typischen Kompressions-Kälteanlagen verwendet. Die vier Hauptkomponenten sind ein Drosselement, ein luftgekühlter Verflüssiger, ein Gaskühler und ein Verdichter [32,31]. Der Verdichter verwendet zwei in Reihe geschaltete Hubkolbenverdichter, um

den Druck des gasförmigen Kohlendioxids zu erhöhen. Das gasförmige Kohlendioxid wird auf den voreingestellten Solldruck von 65,5 bar komprimiert, bevor es in der nachgeschalteten Kälte-/Sprühanlage verflüssigt wird. Der Betriebsdruckschalter ermöglichte die Einstellung des Kohlendioxid-Solldrucks bis zu einem Maximum von 75,84 bar [32,46].

Aufgrund der Reibung steigt die Temperatur des komprimierten Kohlendioxids auf mehr als 49°C an. Um die energieaufwendige Kondensation des erwärmten Kohlendioxids zu vermeiden, es wird ein Gaskühler nachgeschaltet, der mit Hilfe gekühlter Druckluft die Temperatur des komprimierten Kohlendioxids um 11 – 28°C absenkt [31,32,46].

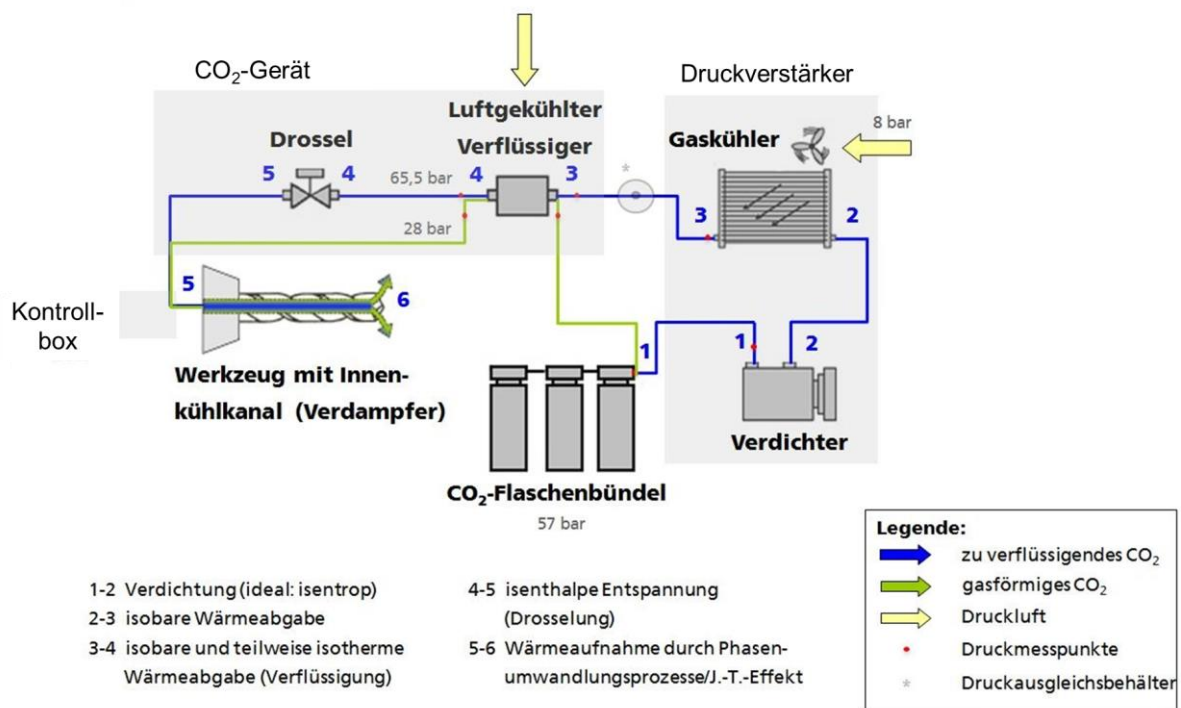


Abbildung 24 :- ChilAire CO₂ -Kühlsystem[31]

Nach der Kompression und Abkühlung bleibt das Kohlendioxid in einem gasförmigen Aggregatzustand. Das ChilAire Amp.-Gerät führt dem ChilAire-Kühl-/Sprühsystem Kohlendioxid zu, wodurch eine höhere und zuverlässigere Durchflussmenge und ein höherer Druck als direkt aus den Zylindern erzeugt werden. Das CO₂-Sprühsystem besteht aus einer Drossel und einem luftgekühlten Kondensator, in dem zuerst die Überhitzungswärme abgebaut wird, um die Temperatur des komprimierten Kohlendioxids auf die Verflüssigungstemperatur zu bringen (etwa 25,5°C bei 65,5 bar). Die Verflüssigungswärme wird dann isotherm und isobar abgeführt, und das flüssige

Kohlendioxid wird weiter unterkühlt. Flüssiges Kohlendioxid ist das Endprodukt des Verflüssigungsprozesses. Der Massen- und Energiefluss des flüssigen Kohlendioxids wird nach der Verflüssigung geregelt [32,46].

Die Steuerventile funktionieren im Zusammenspiel mit den Komponenten der Ausgleichsdrossel (hydraulischer Drosselkreis). Eine einstellbare Querschnittsverengung in den Drosselventilen beeinflusst den Materialfluss. Zusätzlich zur freien Querschnittsfläche wirken sich die Druckdifferenz am Ventil, die Dichte des Durchflussmediums (CO_2) und der Strömungswiderstand im Ventil auf den Volumenstrom aus: Je größer die Druckdifferenz, desto größer der Durchfluss [32,46,31].

Durch die Maschinensteuerung des ChilAire CO_2 -Sprühsystems können vier separate Ventile gewählt werden, um den Durchfluss des flüssigen Kohlendioxids zu verändern (einzeln oder in Kombination). Unterschiedliche Kapillarrohrlängen, die von den Ventilen ausgehen, erzeugen einen unterschiedlichen Widerstand in den Rohren und damit einen unterschiedlichen Kohlendioxidfluss. Alle Kapillaren haben denselben Durchmesser von 0,51 mm und dieselben Materialeigenschaften. Lediglich die Längen unterscheiden sich zwischen den Ventilen vier (1210 mm), drei (900 mm), zwei (570 mm) und dem Ventil eins (270 mm). Sowohl der Durchmesser als auch die Länge des Kapillarrohrs haben aufgrund von Reibungseffekten einen erheblichen Einfluss auf den Druck, die Temperatur und den Massenstrom des flüssigen Kohlendioxids und damit auch auf die Kühlwirkung des flüssigen Kohlendioxidstroms. Je länger das Kapillarrohr ist, desto geringer ist der Druckabfall und desto größer ist der Temperaturabfall. Der Druckabfall und die Temperatursenkung nehmen mit der Kapillarlänge zu, während die Temperatur und der Massendurchsatz sinken [32,46].

4.5 Versuchsaufbau

Der gleiche Versuchsaufbau (Abbildung 26) wurde für den Probeversuch und für alle anderen Experimente zur Schnitttiefenänderung, Schnittgeschwindigkeitsänderung, Vorschubänderung und Volumenströmungsänderung verwendet. Für das Experiment wurde eine 4-achsige HEC 500 D XXL (Hersteller- Starrag Heckert) Fräsmaschine verwendet. Flüssiges CO₂ wurde durch ein Werkzeug mit internen Kühlkanälen in die Schneidzone geleitet. E295 Stahlblöcke wurden im Versuch verwendet. 3 gleiche Werkzeuge wurden verwendet, jedes für einen neuen Block, um den Verschleiß-Effekt des Werkzeugs im Prozess zu minimieren. Das Versuchswerkzeug wurde aus Vollhartmetall mit TiSi-Beschichtung und 20 mm Durchmesser mit Innenkühlung hergestellt.

Das Versuchswerkzeug wurde in die Werkzeugaufnahme HSK 63 mit Spezielsensor zur Temperaturmessung eingesetzt. Der Sensor in der Werkzeugaufnahme misst die Temperatur einmal pro Sekunde, und wird drahtlos an den Computer weitergeleitet. Für die drahtlose Übertragung wird ein kleiner Empfänger verwendet, der in den Computer eingesteckt werden sollte, zur Erkennung des Gerätes muss ein Putty-Programm installiert werden. In der Werkzeugaufnahme ist ein Transmitter eingebaut, der das Signal bei der Drehung der werkzeugaufnahme überträgt. Unten ist das (Abbildung 25) der erforderlichen Teile für die Experimente.

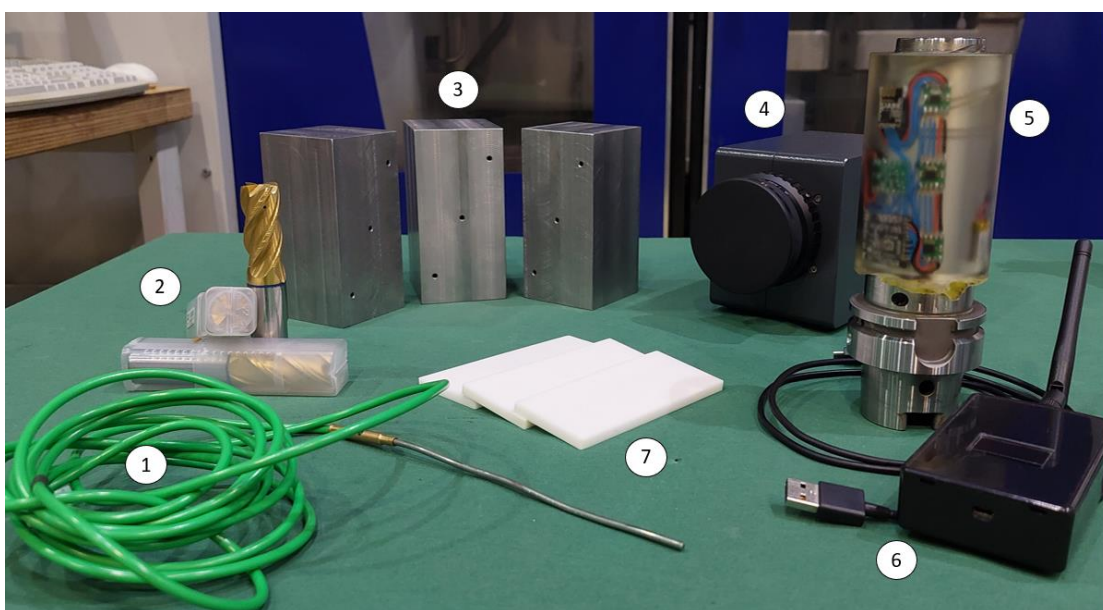


Abbildung 25 :- Verwendete Sachen im Versuch

(1) Thermoelement	(2) Werkzeug	(3) Werkstück(E295)
(4) Thermokamera	(5), (6) Spezial-Werkzeugaufnahme, Datenempfänger	(7) Keramik platten

Drei Thermoelemente wurden zur Temperaturmessung im Werkstück eingesetzt, die mit einem kleinen elektronischen Gerät mit SPS-Programmierung zur Temperaturmessung verbunden waren. Es sammelt sowohl numerische Daten als auch ein Echtzeit-Temperatur/Zeit-Diagramm auf dem Computer. Das Thermoelement wurde so eingestellt, dass es 10 Daten pro Sekunde aufnimmt, um genauere Daten vom Werkstück zu erhalten. Mit Hilfe der Thermokamera kann die Temperaturverteilung und die Maximaltemperatur gemessen werden. Die Thermokamera nimmt 10 Daten pro Sekunde auf. Die Thermokamera wurde an einen Computer angebunden, der zum Sammeln von Daten sowie zu der Steuerung der Kamera verwendet wird. Außerdem zeigt die Kamera die Temperatur in Echtzeit an und sammelt auch numerische Daten, um den kältesten und heißesten Punkt in ihrem Rahmen grafisch darzustellen.

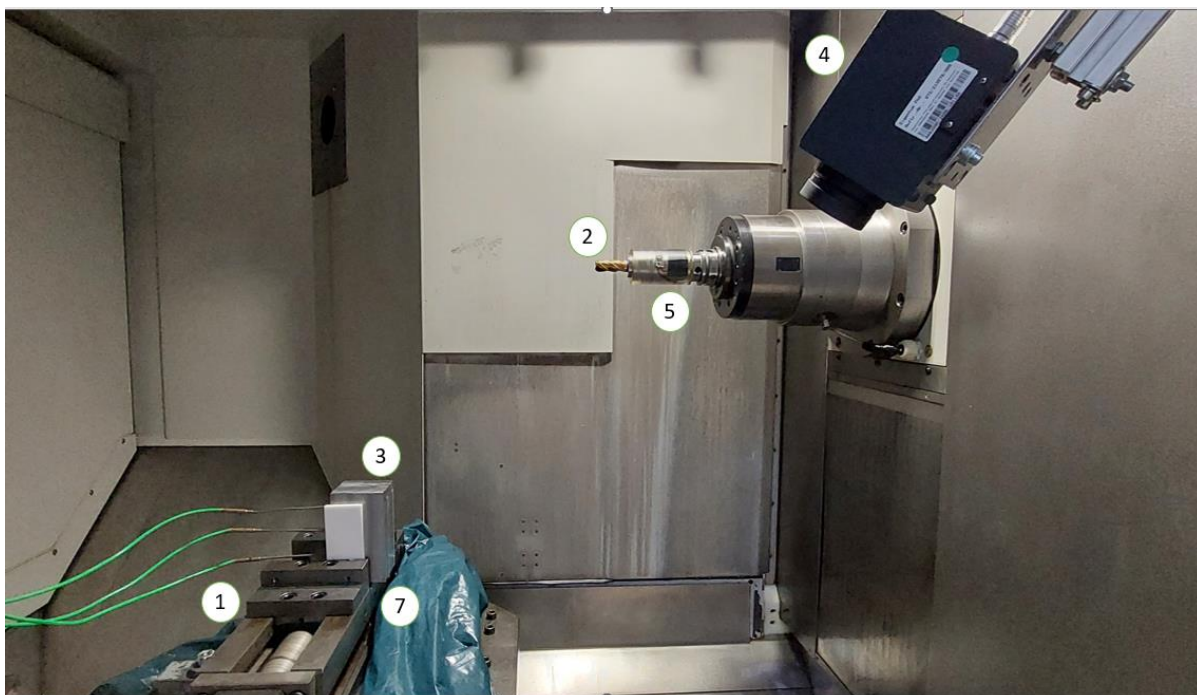


Abbildung 26 :- Versuchsaufbau

Die Anfangstemperatur der Blöcke wurde bei allen Experimenten bei ca. 20°C gehalten. Aus den Ergebnissen des Probeversuchs wurde ersichtlich, dass Werkstück

vom unten und von den Seiten isoliert werden sollte, da die Wärme vom Werkstück zum Frästisch (Schraubstock) fließt. Drei Keramikplatten wurden verwendet, um Werkstück vom unten und von den Seiten zu isolieren. Massenstrom wurde mit einer Waage gemessen und nach jedem Experiment wurde es gemessen und notiert.

4.6 Versuchsreihe

Die Forschung hat gezeigt, dass Schnitttiefe, Vorschub und Schnittgeschwindigkeit die drei Hauptfaktoren für hohe Temperaturen in einem Schneidprozess sind. Alle Versuche wurden geplant, um eine Datenmatrix dieser 3 Hauptfaktoren zu erhalten.

Tabelle 12 :- Versuchsreihe

Blöcke	Schnittgrößen	a_p (mm)	f_z (mm)	v_f (mm/min)	v_c (m/min)
Blöcke 1	Schnitttiefe Änderung	0,5	0,07	447	100
		1	0,07	447	100
		1,5	0,07	447	100
Blöcke 1	Schnittgeschwindigkeit Änderung	1	0,07	447	100
		1	0,07	669	150
		1	0,07	890	200
Blöcke 2	Vorschub Änderung	1	0,047	300	100
		1	0,07	447	100
		1	0,093	593	100
Blöcke 3	Volumenström Änderung (verschiedene Ventil)	1	0,07	890	200
		1	0,07	890	200
		1	0,07	890	200
		1	0,047	300	100

Zuerst wurde ein Probeversuch ohne CO₂-Kühlung durchgeführt, um ein klares Bild über das Temperaturverhalten zu bekommen und auch um die Messtechnik zu überprüfen. Danach wurde in den Hauptversuchen die Schnitttiefe entsprechend verändert und Vorschub und Schnittgeschwindigkeit konstant gehalten. Eine

Schnittgröße wurde verändert und die anderen beiden konstant gehalten. Es wurde eine Datenmatrix erstellt, um eine klare Vorstellung über die Temperaturen und den Kühleffekt von CO_2 durch verschiedene Schnittgrößen zu bekommen, die in der vorstehenden zu sehen ist.

Abschließend wurden verschiedene Ventil Kombinationen verwendet, um das Temperaturverhalten und den Kühleffekt durch die Volumenström Änderung zu ermitteln. Die Vorschubgeschwindigkeit wurde so verändert, dass der Vorschub bei den jeweiligen Experimenten konstant gehalten wurde. 0,5 mm/1 mm/1,5 mm Werte wurden für das Schnittiefenänderungsexperiment eingesetzt. Die höchstmögliche Schnittgeschwindigkeit (von Hersteller des Werkzeugs) von 200 m/min wurde ebenfalls verwendet, um die Extremwerte der Temperaturen durch die Schnittgeschwindigkeit zu überprüfen, ebenso wurden die niedrigsten und höchstmöglichen Werte des Vorschubs während des Experiments berücksichtigt.

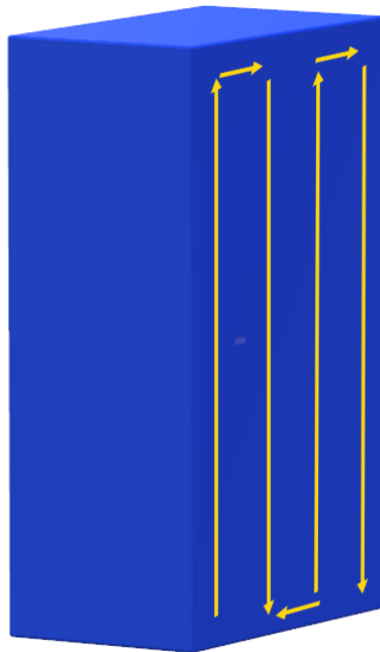


Abbildung 27 :- Verlauf des Werkzeugs am Werkstück

Im ersten Klotz wurden Versuche zur Änderung der Schnitttiefe und der Schnittgeschwindigkeit durchgeführt, im zweiten Klotz wurden Versuche zur Änderung der Vorschubgeschwindigkeit durchgeführt, und der dritte Klotz diente zur Änderung

des Volumenstroms. Mit dem Wechsel des Blocks wurde der Nullpunkt des Werkstücks verändert und sollte jedes Mal manuell kalibriert werden. Das Gleiche gilt für den Werkzeugwechsel, mit jedem neuen Werkzeug sollte es kalibriert werden und die Längen- und Radiusdaten wurden manuell in die CNC-Fräsmaschine eingegeben. Da die Hauptanforderung des Experiments die Kühlwirkung von CO_2 war, war es erforderlich, dass das Werkzeug so lange wie möglich in Kontakt mit dem Werkstück bleibt. Der Weg des Werkzeugs auf dem Werkstück ist Abbildung 27 zu sehen.

5 Auswertung

Für die Auswertung wurden die Temperaturergebnisse von Thermokamera, Thermoelement und Werkzeugaufnahme-Sensor herangezogen. Die Mittelwerte der Temperaturen von drei Thermoelementen wurden genommen, zur Ermittlung der allgemeinen Temperatur des Werkstücks.

5.1 Probe Experiment

Zur Messung der Temperatur an der Werkzeugschneide und zur Bestimmung des Temperaturverhaltens am Werkzeug, am Werkstück und im allgemeinen Raum war es sehr wichtig, ein Experiment ohne CO_2 durchzuführen. Das Hauptziel des Probeversuchs besteht in der Erfassung der Temperaturverteilung im gesamten System und die Messtechnik im Experiment zu überprüfen. Im Probeversuch wurde das Werkstück ca. 20 Minuten lang mit 0,3mm Schnitttiefe und einer Schnittgeschwindigkeit von 100 m/min gefräst.

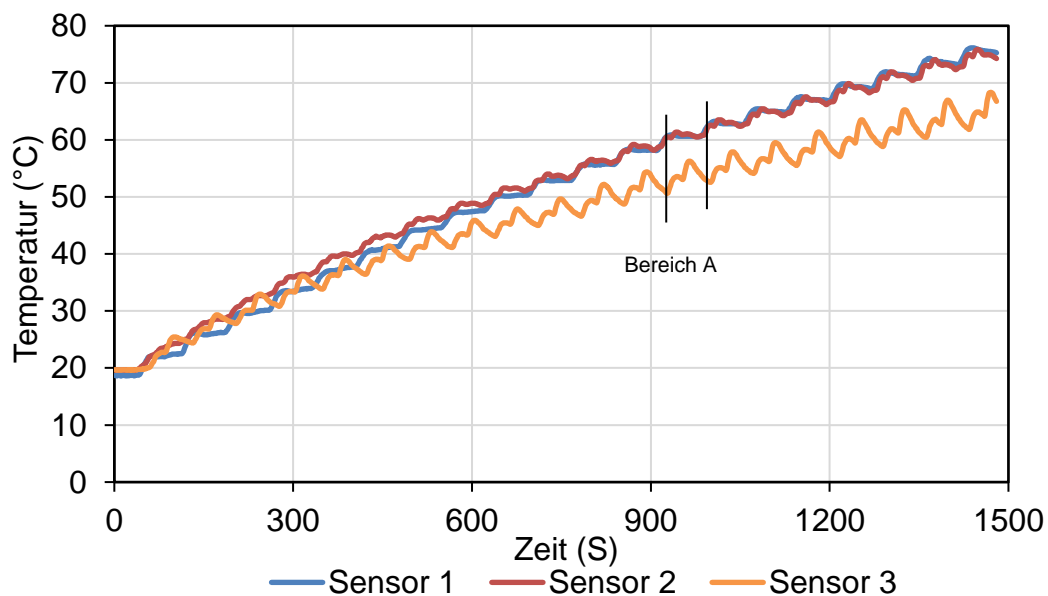


Abbildung 28 :- (Temperatur vs. Zeit) Thermoelement

Thermoelemente können die Temperatur nur an ihrer Spitze messen, wie in Abbildung 28 gezeigt, wurde die Temperatur mit der Zeit in Sekunden gemessen, Bereich A ist eine Schicht von 0,3 mm im Werkstück, so bildet sich dieses treppenartige Diagramm (Abbildung 28), während einmal Fräser die Stelle gefräst und abgefahren hat, ist die

Wärme im werkstück abgeleitet. Werkstück wurde nach 20 min auf 75°C erwärmt. Sensor 3 zeichnet die Temperatur bis 65°C auf, weil dieser Sensor in der Nähe des Schraubstocks steht, an dem das Werkstück gespannt war. Die Wärme auf dem Frästisch entfernen.

Im Zerspanungsprozess am anfangs steigt die Temperatur mit der Zeit linear an, aber nach einer sehr langen Zeit x wird es konstant mit der Zeit. Aus vergangenen Forschungen und Experimenten sieht die Temperatur-Zeit-Kurve im Zerspanungsprozess wie (Abbildung 29) aus.

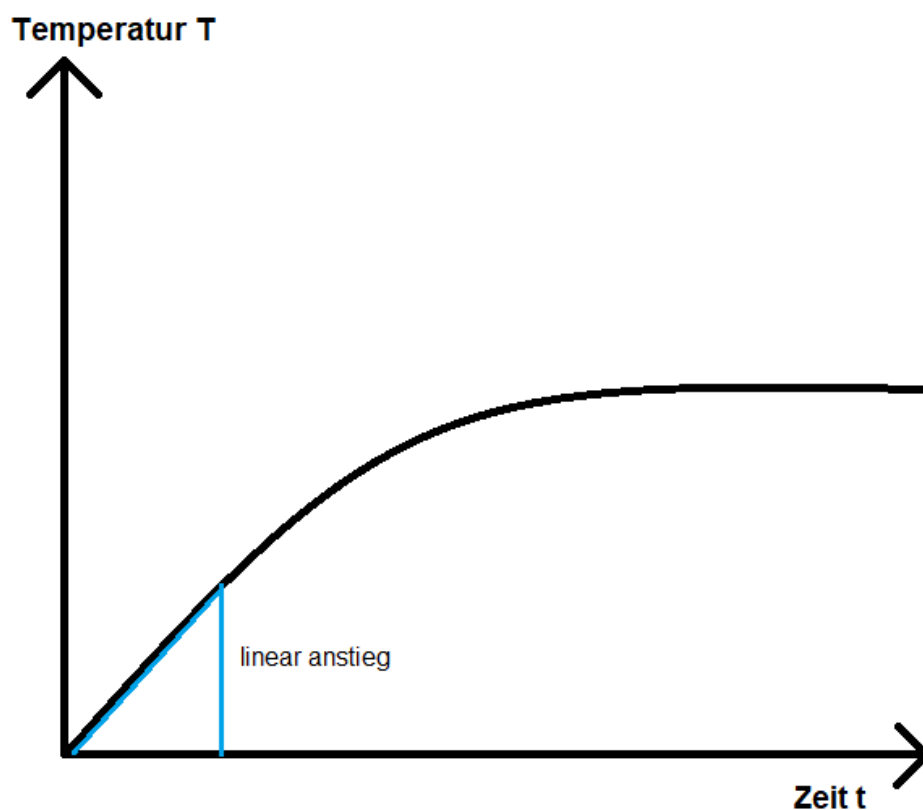


Abbildung 29 :- Temperatur V/S Zeit verlauf in Zerspanungsprozess

Für dieses Experiment kann man aus dem Bild erkennen, dass die Temperatur in den ersten 200 Sekunden linear mit der Zeit wächst. Mit diesem Anstieg der Temperatur mit der Zeit, kann die Wärmeleistung \dot{Q}_{ref} mit Gleichung 26 berechnet werden. Innerhalb von 3 Minuten wurde das Werkstück von 20°C auf 30°C erwärmt (Abbildung 28).

$$\dot{Q} = m * C * \frac{\Delta T}{t} \quad (26)$$

$$m = v * \rho = (120\text{mm} * 60\text{mm} * 20\text{mm}) * (7900) \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = 1,1376 \text{ Kg}$$

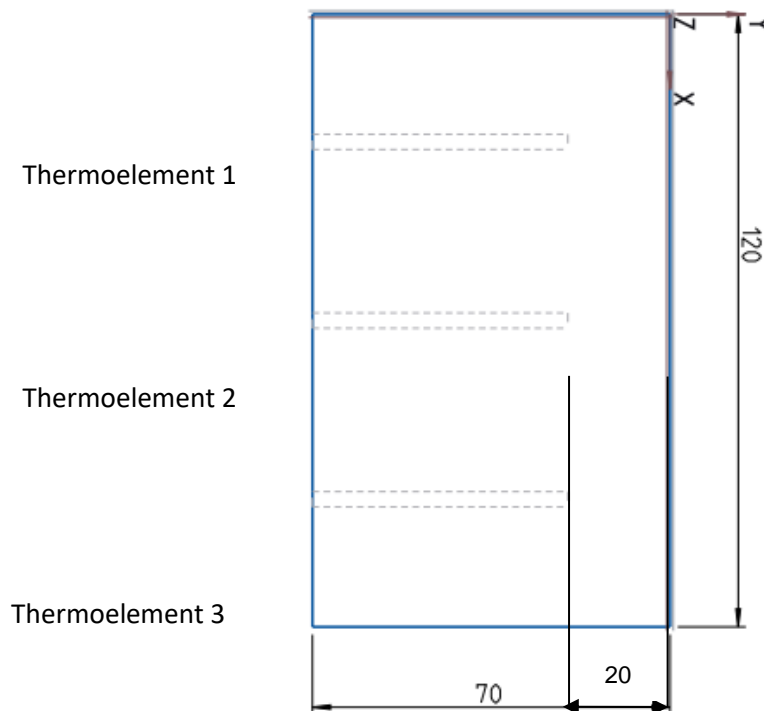


Abbildung 30 :- Seitenansicht des Werkstücks

v = Volumen des im Experiment verwendeten Stahlblocks (120 mm * 60 mm * 70 mm); die Höhe beträgt 20 mm, weil die Thermoelemente in einem Abstand von 20mm von der Schneidzone angeordnet waren und 30° Temperatur wurde vom Thermoelement aufgezeichnet.

$$C \text{ von Stahl E295} = 470 \frac{\text{J}}{\text{Kg} * \text{K}}; (\text{L})$$

$$\Delta T = 30^\circ - 20^\circ = 10^\circ \text{K};$$

$t = 200 \text{ sek.}$; zeit für fräsen;

; Die Werte in Gleichung (26) einsetzen

$$\dot{Q}_{\text{ref}} = 1,1376 \text{ Kg} * 470 \frac{\text{J}}{\text{Kg} * \text{K}} * \frac{10 \text{ K}}{200 \text{ sek.}} = 26,73 \text{ Watt}$$

Nach [8] werden 7 % Wärme vom Werkstück aufgenommen, 75 % Wärme wird mit den Spänen abgeführt und 18 % Wärme fließt an das Werkzeug.

Leistung in Werkstück = 26,73 Watt; das entspricht 7 % der Gesamtleistung.

Das heißt Gesamtleistung im Fräse Prozess = 381,85 Watt.

Die theoretische Leistung aus der Tabelle 9 entnommen. Die (Tabelle 13) enthält die Daten zum Vergleich der theoretisch berechneten Leistung $P_{u \text{ theo}}$ und der experimentell geschätzten Leistung $P_{u \text{ Pr.Ab}}$ für 0,3 mm schnitttiefe.

Tabelle 13 :- Vergleich zwischen $P_{u \text{ theo}}$ und $P_{u \text{ Pr.Ab}}$

$a_p(\text{mm})$	$P_{u \text{ theo}}(\text{W})$	$P_{u \text{ Pr.Ab}}(\text{W})$
0,3	146,03	381,85

Mit zunehmender Schnitttiefe steigt die Wärme. Aus der experimentell geschätzten Leistung kann die Leistung für die verschiedenen Schnitttiefen extrapoliert werden, vgl. (Tabelle 14). Die theoretische Leistung aus der Tabelle 9 entnommen und aus experimentell geschätzter Leistung $P_{u \text{ Pr.Ab}}$ für 0,3 mm schnitttiefe. Für die Extrapolieren wird die Leistung als linear mit der Schnitttiefe ansteigend vorausgesetzt. Für 0,3mm Schnitttiefe ergibt sich eine Leistung von 381,85 W. Mit der Kreuzmultiplikation kann die Leistung für 1,5 mm Schnitttiefe auf 1909,25 W berechnet werden.

Tabelle 14 :- Vergleich zwischen $P_{u \text{ theo}}$ und $P_{u \text{ EP}}$

$a_p(\text{mm})$	$P_{u \text{ theo}}(\text{W})$	$P_{u \text{ EP}}(\text{W})$
0,5	243,21	636,41
1	486,42	1272,83
1,5	729,64	1909,25

Es gibt einen großen Unterschied zwischen theoretisch ermittelter Leistung und Extrapoliert Leistung. Bei der Praktischen Abschätzung kann η berechnet werden.

$$\eta = \frac{P_u}{\dot{Q}}$$

Bei allen Versuchen wurde ein konstanter CO_2 -Strom (Ventil 4) verwendet,

$$\rho \text{ von } \text{CO}_2 \text{ in } 20^\circ\text{C und } 64 \text{ bar} = 793,06 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$C \text{ von } \text{CO}_2 = 849 \frac{\text{J}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$$

$$\Delta T = -78,33 - 20 = -98,33\text{K} (\text{Trockeneis } = -78,33^\circ\text{C}, 20^\circ \text{C für Raum Temperatur})$$

$$\dot{m} = 0,037 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{Q} = \dot{m} * C * \Delta T$$

$$\dot{Q} = 0,037 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} * 849 \frac{\text{J}}{\text{Kg} \cdot \text{K}} * 98,33\text{K} = 3088,84 \text{ W}$$

$Q_{kr}(\text{W})$ Kryogene Leistung = 3088,84; war konstant in allen Versuchen. Tabelle 15 kann für den Wert von η eingesehen werden.

Tabelle 15 :- Berechnung der Kühlwirkung

$Q_{kr}(\text{W})$	$P_{u \text{ Pr. Ab}}(\text{W})$	η
3088,84	381,85	0,12

Für die extrapolierte Leistung kann auch die η Kühlwirkung berechnet werden, die Tabelle zeigt die extrapolierte Kühlwirkung für verschiedene Schnitttiefen

Tabelle 16 :- Berechnung der extrapolierte Kühlwirkung

$Q_{kr}(\text{W})$ Kryogene Leistung	$P_{EP}(\text{W})$ Extrapolierte Leistung	η Kühlwirkung
3088,84	636,41	0,20
3088,84	1272,83	0,41
3088,84	1909,25	0,61

Die Thermokamera nimmt die Gesamtwärme im Bild auf, ebenso den höchsten Temperaturpunkt. Die höchste Temperatur wurde zwischen Schneide und Werkstück gemessen. Diese Temperatur kann auch für Späne genommen werden, weil Späne in der Schneidzone gebildet werden und genau zwischen Schneide und Werkstück entstehen. Bereich A (Abbildung 31) ist auch in der Thermokamera zu sehen, die höchste aufgezeichnete Temperatur am Ende des Prozesses war 266,2°C.

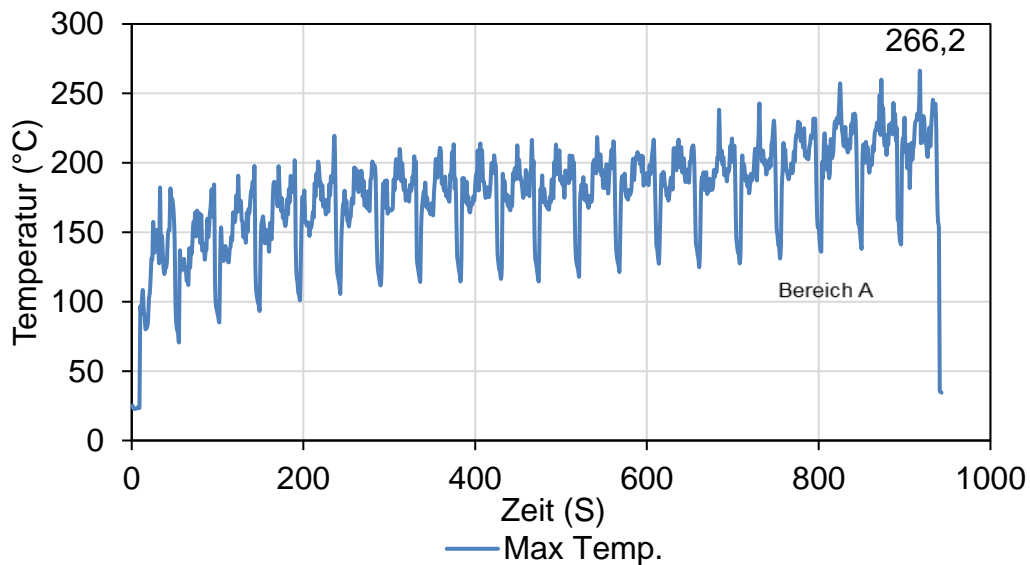


Abbildung 31 :- (Temperatur vs. Zeit) Thermokamera

Werkzeugaufnahme Sensor 1 war 45mm von der Schneide entfernt, trotzdem wurde es ca. 66°C warm. Sensor 2 und Sensor 3 sind oberhalb von Sensor 1, so dass die Wärme langsam mit der Zeit fließt. Die Ergebnisse der Werkzeugaufnahme hängt von vielen Faktoren ab, wie z.B. dem Material der Werkzeugaufnahme, der Leitfähigkeit, der Wärmeleitfähigkeit und auch der Wärme, die in der Luft abgeleitet wird.

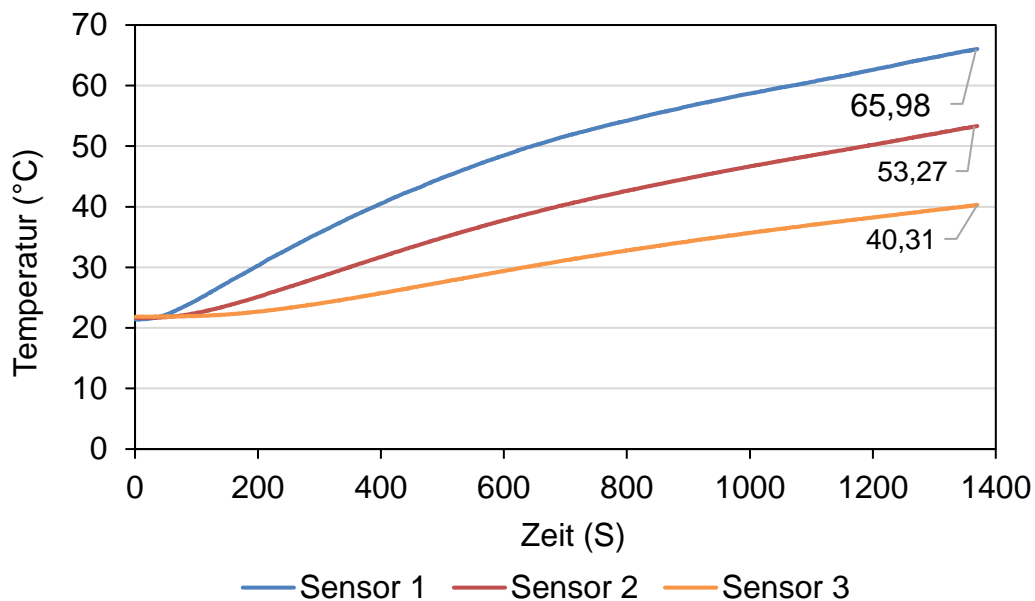


Abbildung 32 :- (Temperatur vs. Zeit) Werkzeugaufnahme Sensor

Im Probeversuch kann man sehen, dass die Wärme linear ansteigt, aber nach einer langen Zeit, sobald fast ein Gleichgewicht, mit dem den Fräsprozess umgebenden System erreicht ist, wird die Wärme konstant. Auch die Isolierung des Werkstücks vom Frästisch ist obligatorisch, um die Wärme im Werkstück zu halten, die Ergebnisse des Werkzeugaufnahmesensors sind in (Abbildung 32) zu sehen

5.2 Schnittiefe Änderung

Schnitttiefe ist einer der beeinflussenden Faktoren zur Erwärmung des Zerspanung Prozess, Es wird mit dem untenstehenden Diagramm deutlich, dass bei 0,5 mm Schnitttiefe und einem CO_2 Massenstrom von 0,037 Kg/s, die Wärme im Durchschnitt $39,63^\circ\text{C}$ in der Thermokamera erreicht. Für die experimentelle Untersuchung des Einflusses der Schnitttiefe auf die CO_2 -Kühlwirkung wurden die Werte von Schnittgeschwindigkeit und Vorschub nicht verändert, auch das Auswahlventil wurde konstant gehalten (Nr. 4), so dass der CO_2 -Massenstrom von 0,0370 Kg/Sek. konstant war. Die Schnitttiefe wurde von 0,5mm, dann auf 1mm und zuletzt auf 1,5 mm verändert. Der Probeversuch hat gezeigt, dass eine Schnitttiefe von 0,3 mm nicht ausreicht, weil das niedrigste Ventil (Nr. 4) einen Massenstrom von 0,0370 kg/Sek. zulässt, der bereits viel höher ist als berechnet. Es ist zu beobachten, dass eine Erhöhung der Schnitttiefe den Kühleffekt des CO_2 verringert, die Durchschnittstemperatur in der Thermokamera (Abbildung 33) beträgt bei 1mm

Schnitttiefe und 1,5mm Schnitttiefe 62,75°C bzw. 74,91°C. Auch bei 1,5mm Schnitttiefe gab es Schwingungen im Prozess.

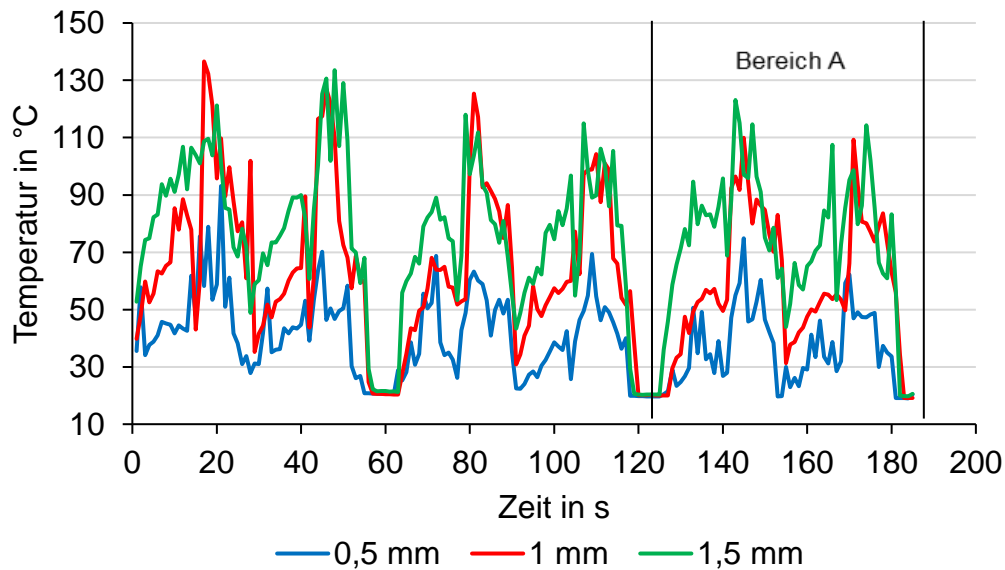


Abbildung 33 :- (Temperatur vs. Zeit) Thermokamera

Auf der anderen Seite zeigt sich in Sensoren auf Werkzeugaufnahme (Abbildung 34) eine Absenkung der Temperatur unter 20°C. Außerdem ist bei diesem Versuch zu erkennen, dass die Zeit zum Erreichen der niedrigsten Temperatur mit zunehmender Schnitttiefe in der Regel ansteigt. Die kürzeste Zeit wurde mit 175 Sekunden bei einer Temperatur von bis zu 2,45°C im Werkzeugaufnahme Sensor erreicht.

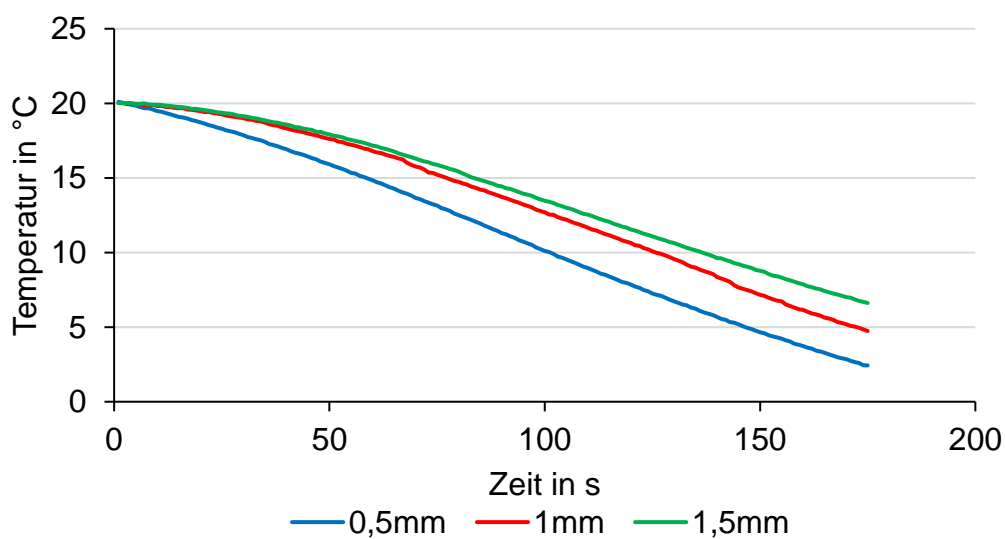


Abbildung 34 :- (Temperatur vs. Zeit) Werkzeugaufnahme Sensor

Werkzeugaufnahme-Sensor (Abbildung 34) zeigte 11,48°C in 0,5 mm Schnitttiefe, 13,48°C und 14,24°C in 1mm bzw. 1,5mm Schnitttiefe. Thermoelemente im Werkstück zeigten, dass die Temperatur des Werkstücks (Abbildung 35) in allen drei Schnitttiefen fast unter 18 bis 20°C gehalten wurde. Bei 0,5 mm Schnitttiefe war der Werkstück 18°C warm, bei 1 mm 18,37°C und 19,26°C bei 1,5 mm Schnitttiefe. Im Werkstück wurde fast keine Wärme abgebaut, die Ergebnisse des Werkstücks sind unten zu sehen.

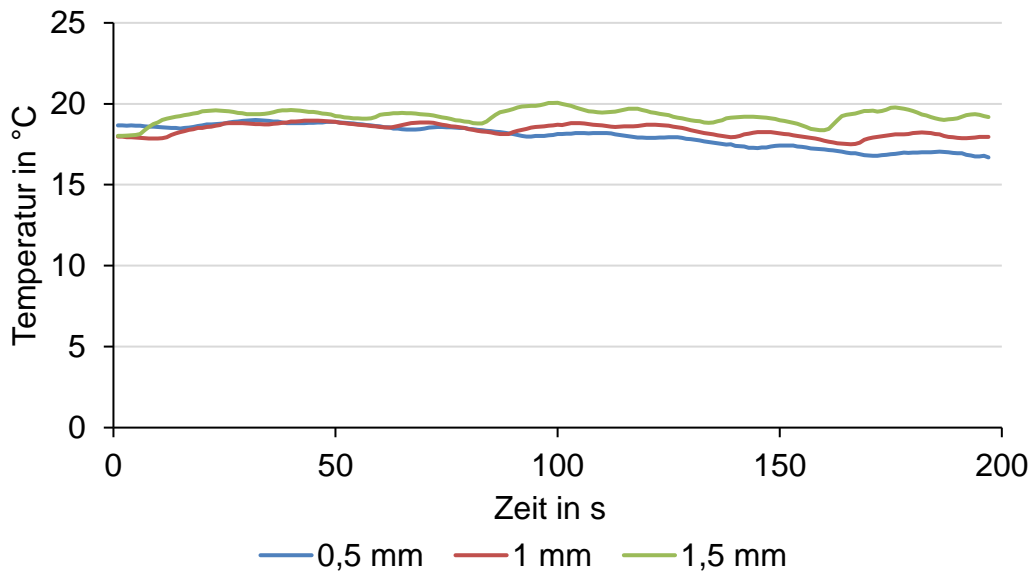


Abbildung 35 :- (Temperatur vs. Zeit) Thermoelement

5.3 Schnittgeschwindigkeit Änderung

Die Schnittgeschwindigkeit ist der am stärksten beeinflussende Faktor für den Kühleffekt. Vorschub sollte konstant bleiben, um den Einfluss der Schnittgeschwindigkeit zu analysieren. Vorschub sollte konstant bleiben, um den Einfluss der Schnittgeschwindigkeit zu analysieren. Mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit sollte auch die Vorschubgeschwindigkeit erhöht werden, um den Vorschub konstant zu halten, weil beide mit der Drehzahl der Spindel zusammenhängen. Mit der Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit sinkt die Fräszeit, wie auch in der (Abbildung 36) zu sehen ist, mit der Erhöhung der Drehzahl sinkt die Fräszeit.

Die Thermokamera zeigt, dass eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit den Kühleffekt deutlich verringert. Der Bereich A ist in der untenstehenden Grafik deutlich zu erkennen, der Bereich A beträgt bei diesem Versuch 1 mm, mit steigender

Schnittgeschwindigkeit nimmt der Bereich A ab. Die Thermokamera zeigte einen Temperaturdurchschnitt von 62,75°C, 73,8°C und 74,68°C bei einer Schnittgeschwindigkeit von 100 m/min, 150 m/min bzw. 200 m/min.

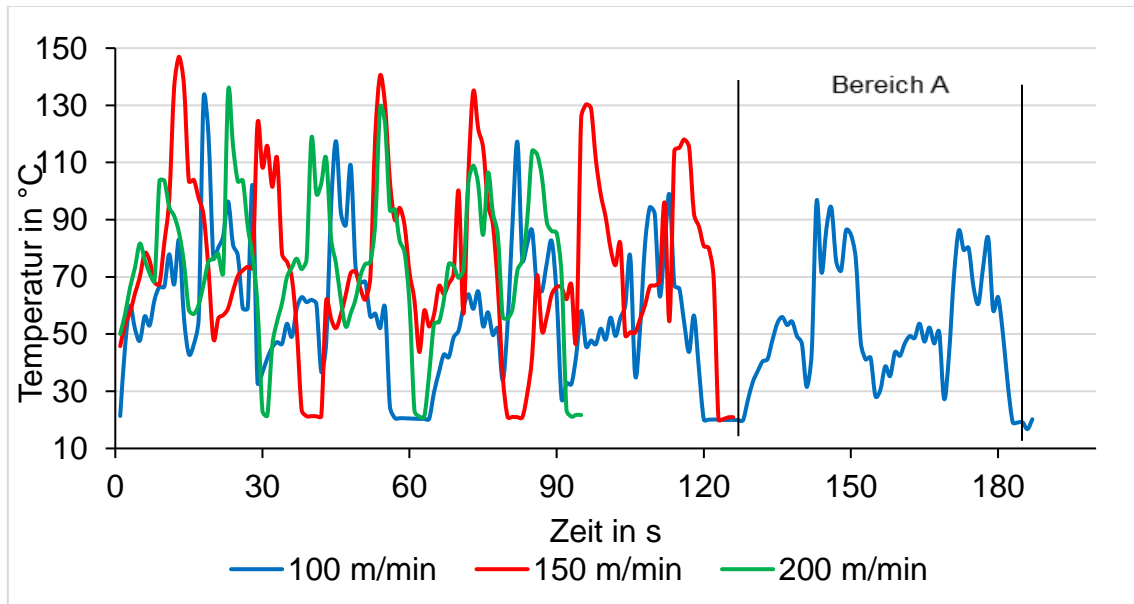


Abbildung 36 :- (Temperatur vs. Zeit) Thermokamera

Werkzeugaufnahme - Sensor zeigt die Abkühlung des Werkzeugs auf 13,48°C in ca. 190 Sekunden bei der Schnittgeschwindigkeit von 100m/min. Bei 150m/min und 200 m/min zeigt es eine Durchschnittstemperatur von 15,91°C bzw. 17,27°C (Abbildung 37). Es ist zu erkennen, dass die CO₂ Abkühlung mehr auf dem Werkzeug ist, da die Kanalöffnungen des Werkzeugs an den Seiten und nicht an der Vorderseite des Werkzeugs waren.

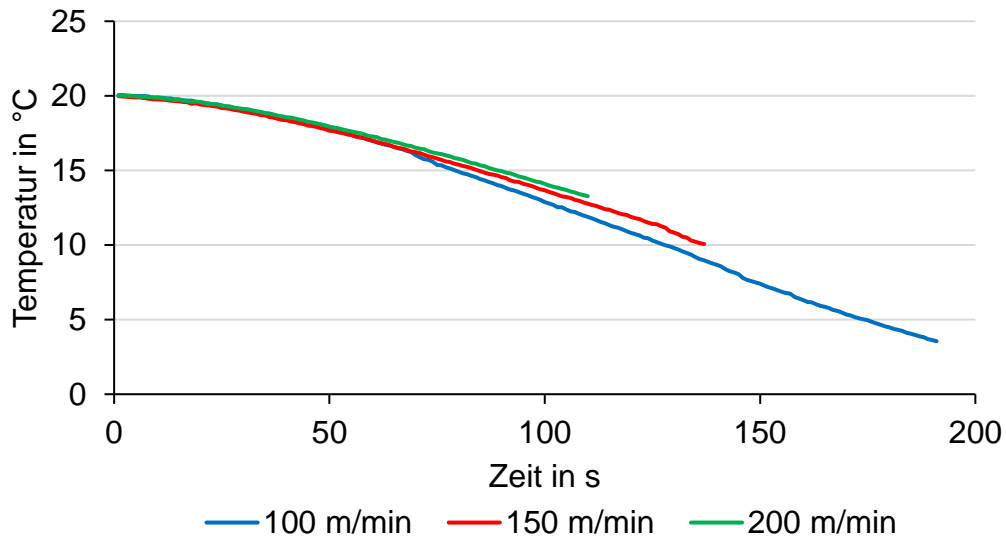


Abbildung 37 :- (Temperatur vs. Zeit) Werkzeugaufnahme Sensor

Das Thermoelement im Werkstück zeigte einen Temperaturanstieg mit steigender Schnittgeschwindigkeit, aber es war immer noch kein großer Unterschied, während bei 100 m/min die durchschnittliche Temperatur des Werkstücks 18,37°C beträgt und bei 200 m/min eine Temperatur von 20,34°C erreicht wird. Es ist in (Abbildung 38) zu sehen.

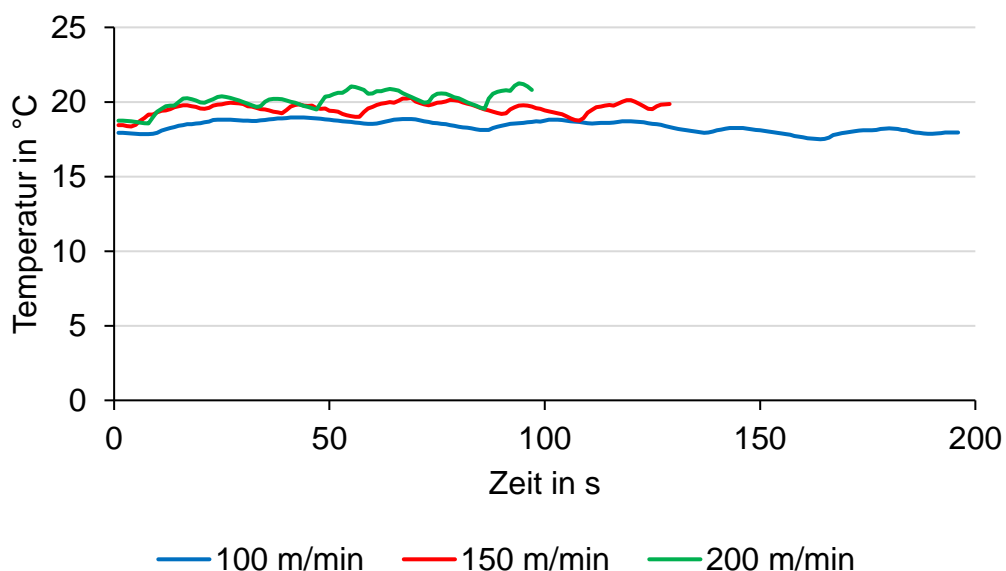


Abbildung 38 :- (Temperatur vs. Zeit) Thermoelement

5.4 Vorschub Änderung

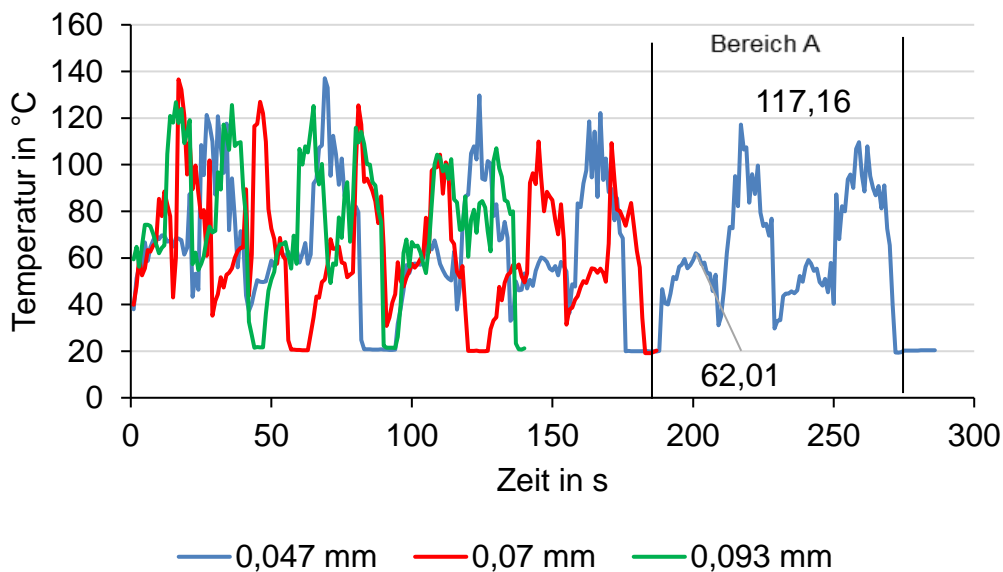


Abbildung 39 :- (Temperatur vs. Zeit) Thermokamera

Bei den Experimenten zur Auswirkung von Vorschub auf die Kühlwirkung von CO_2 wurden Schnittgeschwindigkeit und Schnitttiefe konstant gehalten. Um unterschiedliche Vorschubgeschwindigkeiten zu erhalten, sollte die Vorschubgeschwindigkeit verändert werden. Mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit steigt Bereich A an. In der (Abbildung 39) ist die Auswirkung von Gleichlaufräsen und Gegenlaufräsen auf die Temperatur zu sehen, in der ersten Hälfte von Bereich A, 1. Band des Fräasers, kann man sehen, dass die Temperaturen bis ca. 62°C erreicht werden und dann im 2. Band des Fräasers, steigt die Temperatur auf 117°C , fast das Doppelte. Es ist deutlich zu sehen, dass Gegenlaufräsen sich negativ auf die Abkühlung von CO_2 auswirkt. Mit $0,047\text{ mm}$ Vorschub ist eine durchschnittliche Temperatur von $62,50^\circ\text{C}$ in der Thermokamera zu sehen. Bei $0,07\text{ mm}$ Vorschub bleibt die Temperatur bei $62,75^\circ\text{C}$, aber bei einem Vorschub von $0,093\text{ mm}$ steigt die Durchschnittstemperatur auf $75,62^\circ\text{C}$ in der Thermokamera. Der Grund für die fast gleichen Temperaturen bei $0,047\text{ mm}$ und $0,07\text{ mm}$ ist der Massenstrom, für beide Vorschübe war der Massenstrom viel höher, so dass der Unterschied in der Temperatur auf vernachlässigbar reduziert wurde. Es liegt auch an der Zeit, $0,047(100\text{ Sek.})$ benötigt mehr Zeit, um eine Schicht zu bearbeiten und $0,07(66\text{ Sek.})$ benötigt weniger Zeit.

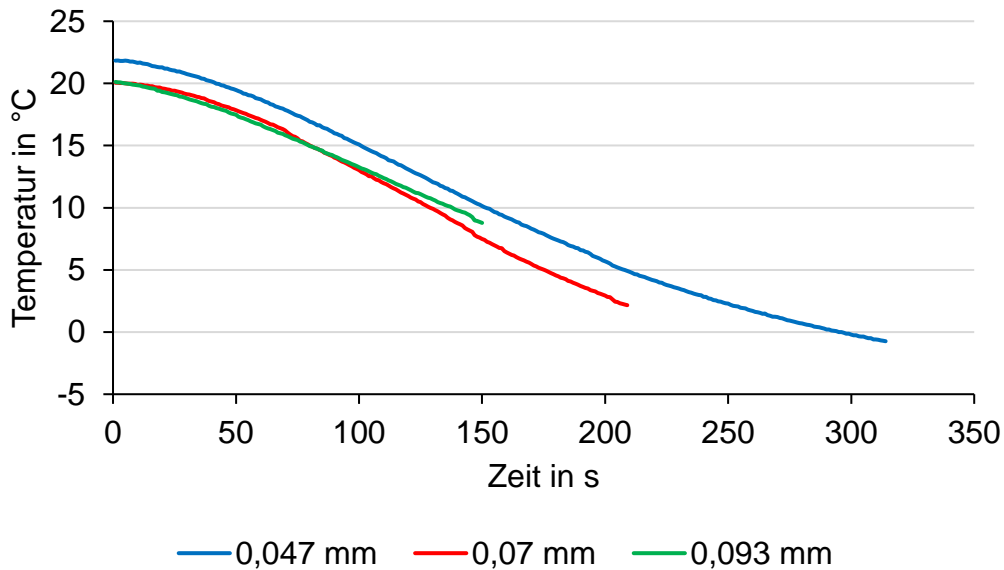


Abbildung 40 :- (Temperatur vs. Zeit) Werkzeugaufnahme Sensor

Werkzeugaufnahme - Sensor zeigt die Temperatur unter 0°C am Ende des Experiments mit 0,047mm Vorschub. Der Verlauf der Temperatur in allen drei Vorschüben war ziemlich gleich, es ist aus dem (Abbildung 40) ersichtlich. Eine durchschnittliche Temperatur von 10,06°C, 13,48°C und 15,11°C kann mit 0,047 mm, 0,07mm und 0,093mm Vorschub jeweils gesehen werden. Es ist klar, dass die Erhöhung der Vorschub reduziert die kühlende Wirkung von CO₂ aus der Grafik.

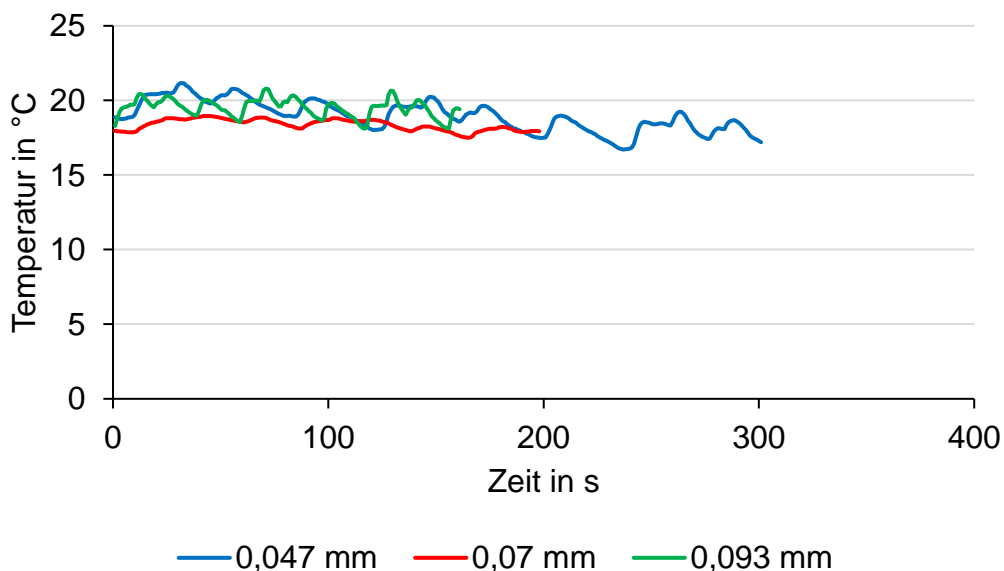


Abbildung 41 :- (Temperatur vs. Zeit) Thermoelement

In Werkstück sind die durchschnittlichen Temperaturen von 18,37°C(0,047mm), 18,96°C(0,07mm) und 19,51°C(0,093mm) aus dem (Abbildung 41) ersichtlich.

5.5 Volumenstrom Änderung

Dieses Experiment wurde geplant, um die Auswirkung des Volumenstroms zu sehen, indem die Schnittgeschwindigkeit (200m/min), die Schnitttiefe (1mm) und der Vorschub (0,07mm) konstant gehalten wurden. Durch das Ändern des Ventils des CO₂-Kühlsystems ändert sich der Massenstrom. Ventil 4 hat den niedrigsten Massenstrom und Ventil 1 den höchsten Durchsatz. Zuerst wurde das Ventil 4 verwendet und es wurden 74,68°C Durchschnittstemperatur in der Thermokamera gemessen (Abbildung 42). Nach dem Ventil 4 wurde das Ventil 3 und die Ventilkombination aus 1 und 4 verwendet, aber es wurden immer noch Durchschnittstemperaturen von 78°C und 81,44°C gemessen.

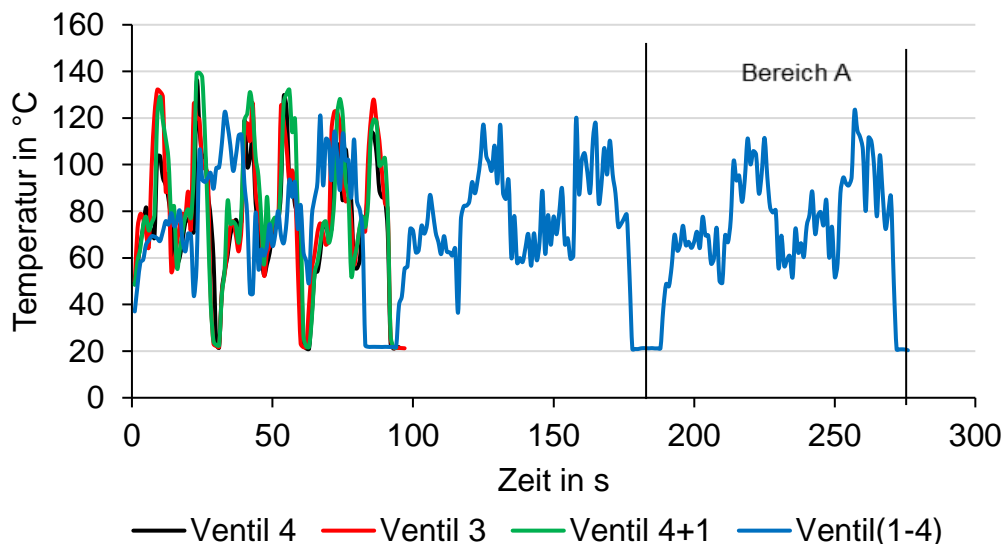


Abbildung 42 :- (Temperatur vs. Zeit) Thermokamera

Nach 3 Experimenten war klar, dass es keinen großen Unterschied in der Durchschnittstemperatur gab, so dass für das letzte Experiment die Schnittgröße geändert wurde (Schnittgeschwindigkeit-100m/min, Vorschub-0,047mm), um zu prüfen, ob mehr Zeit des Fräsens klarere Ergebnisse liefern kann. Diesmal wurden alle 4 Ventilen in Kombination verwendet, um eine maximale Menge an Massenstrom zu erhalten. Es war klar, dass auch nach dem Wechsel des Ventils der CO₂-Verbrauch bei allen vier Ventilen gleich war. Obwohl für die letzten Experimente mit allen 4 Ventilen eine Durchschnittstemperatur von 73,48°C in der Thermokamera angezeigt wurde (Abbildung 42). Der Grund für den fast gleichen CO₂-Verbrauch ist der

Durchmesser des Werkzeugkühlkanals, der vom Schaftfräser an der Schneide 1,5 mm betrug. Das CO₂-Kühlsystem funktioniert nach dem Prinzip, dass der Durchmesser des Ventils gleich ist, aber die Länge unterschiedlich. Es ist effizient, aber nur wenn der Werkzeugdurchmesser in einem sehr kleinen Bereich liegt. Experimente in der Vergangenheit haben gezeigt, dass der Bereich von 0,75mm bis 1,5mm effizient ist, um die Veränderung des Massenstroms durch die Ventile zu sehen. Bereich A ist im Thermokamera (Abbildung 42) zu sehen, es ist der längste von allen 4 Experimenten, aufgrund der geringeren Vorschubgeschwindigkeit.

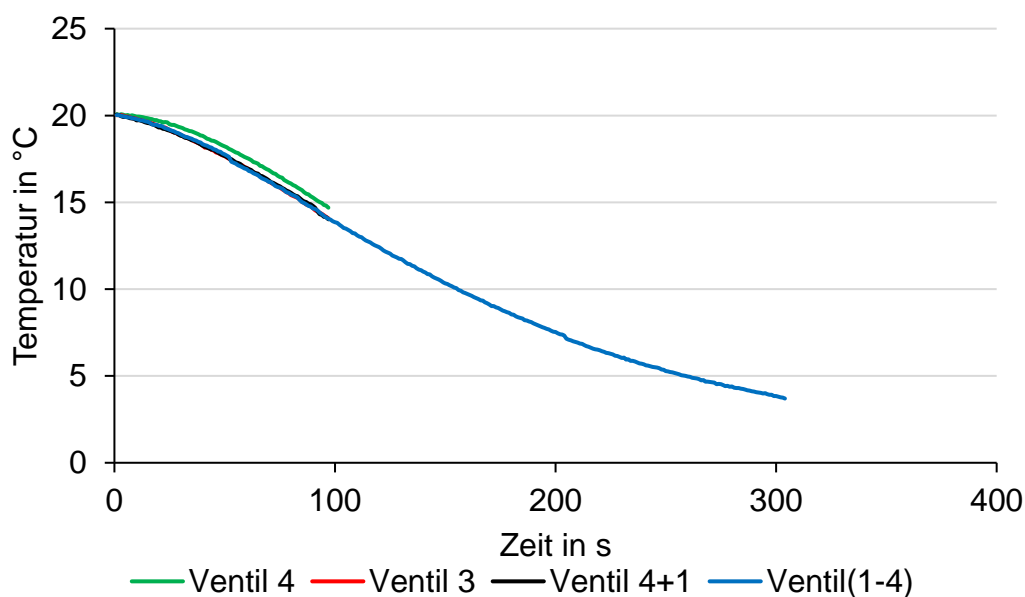


Abbildung 43 :- (Temperatur vs. Zeit) Werkzeugaufnahme Sensor

Der Werkzeugaufnahme -Sensor (Abbildung 43) zeigte 17,27°C in Ventil 4, 17,50°C in Ventil 3 und 17,51°C in Ventil (1+4), aber er zeigte eine signifikante Veränderung der Durchschnittstemperatur von 10,98 in Ventil(1+2+3+4), weil es die längste Fräsen Zeit von 4 Experimenten war.

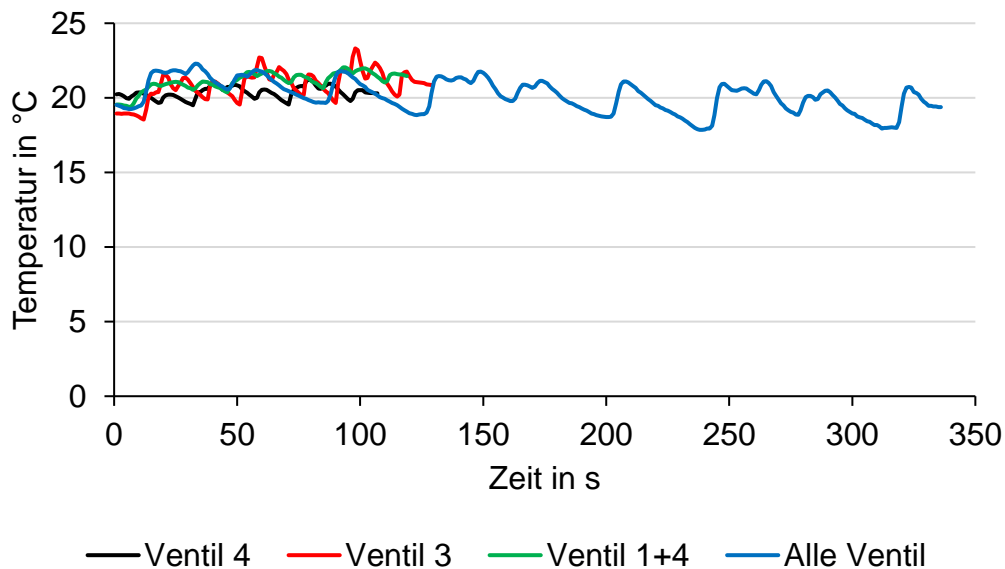


Abbildung 44 :- (Temperatur vs. Zeit) Thermoelement

In allen 4 Versuchen zeigte das Thermoelement (Abbildung 44) eine fast exakte Durchschnittstemperatur an. 20,34°C (Ventil 4), 20,85° C (Ventil 3), 21,11°C (Ventil 1+4) und 20,15°C (Ventil 1+2+3+4). Auch der CO₂-Verbrauch war bei allen 4 Experimenten gleich, nämlich 0,037 kg/Sek. Obwohl dieses Experiment nicht erfolgreich war, können daraus viele Daten und Informationen gesammelt werden.

5.6 Systematische Fehler

Neben der Messungenauigkeit der Wärmebildkamera von +/- 1,5 °C, gibt es auch einige Messunsicherheiten bei Werkzeugaufnahme -Sensor und Thermoelement. Während des Experiments wurde der Massenstrom mit Hilfe einer Wäge Anlage überprüft, auf der CO₂-Zylinder montiert waren. Die Genauigkeit dieser Wäge Anlage beträgt nur bis zu 0,5 kg, die Masse des im Experiment verwendeten CO₂ kann also nicht genau gemessen werden. Der Massenstrom wurde auf denselben Wert festgelegt und war viel höher als der erforderliche Wert.

Der Hauptfehler des Kühlsystems bestand darin, dass es den Massenstrom auf der Grundlage der Länge der Rohre ändert, anstatt auf der Grundlage des Durchmessers der Rohre. Nach dem Hagen-Poiseuille-Gesetz ist die Durchflussmenge proportional zum (Radius)⁴ des Rohrs und invers proportional zur Länge, und es gibt Möglichkeiten, den Radius anstelle der Länge der Schläuche zu verringern. Das CO₂-Kühlsystem funktioniert nach dem Prinzip, dass ein Druck erzeugt wird und

dann der Kanalquerschnitt des Werkzeugs dem Durchfluss Widerstand bietet, dann ist die Durchflussrate. Der Kühlkanal des Werkzeugs war nicht klein genug, um verschiedene Durchflussraten von CO_2 zu haben. Aus dem Versuch ist ersichtlich, dass die Rohrreibung den Kohlendioxidfluss innerhalb eines bestimmten Bereichs des Werkzeugdurchmessers beeinflusst. Es sollte eine spezielle Technologie zur Regulierung des Durchflusses von flüssigem Kohlendioxid entwickelt werden.

Bei der derzeitigen Technologie ist der einzige Widerstand für flüssiges Kohlendioxid der innere Kanaldurchmesser des Werkzeugs, so dass ein spezifischer Volumenstrom nicht erzeugt werden kann. Es gibt keine spezifische Technologie, um den Durchfluss von flüssigem Kohlendioxid zu regulieren, mit dem Einsatz von Ventilen können insgesamt nur 24 verschiedene Arten von Massenstrom eingestellt werden. Kryogenes Schneiden ist auch sehr kostenaufwendig, weil es die Abkühlung von CO_2 auf ein extremes Niveau erfordert. Außerdem können die CO_2 -Zylinder nicht vollständig genutzt werden. 50 bis 70 kg CO_2 sollten in den Zylindern verbleiben, damit die Kühlwirkung effizient ist.

In Zukunft sollen für die Kryogenbearbeitung spezielle Werkzeuge mit sehr kleinen inneren Kühlkanälen verwendet werden, um konkrete Aussagen machen zu können. Derzeit wird zur Messung des Massenstroms von Kohlendioxid eine Waage verwendet. Für zukünftige Weiterentwicklungen sollte auch eine spezielle Messtechnik mit dem ventilspezifischen Massenstrom gemacht werden, um die Messfehler und Abweichungen zu eliminieren. Da im Prozess sowohl flüssiges als auch gasförmiges CO_2 verwendet wird, kann mit der Formel nur die Menge an flüssigem CO_2 bestimmt werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der Einsatz von hochwarmfesten Werkstoffen wie Titan und Kunststoffen wie PEEK in der Produktion hat stark zugenommen, ebenso die globalen industriellen Anforderungen an die Qualität. Dies erhöht die Nachfrage nach einer Verbesserung der Produktionstechnologien. Die Kryogene Kühlung ist eine relativ neue Technologie und wird in der Industrie noch nicht sehr häufig eingesetzt. Auch die Warmabteilung in der Zerspanungstechnik unterscheidet sich mit den Materialeigenschaften, der Werkzeuggeometrie und den Eigenschaften und Schnittbedingungen.

Kryogene Kühlung bringt zahlreiche Schwierigkeiten mit sich, wie z.B. das Kohlendioxid selbst, ein Treibhausgas, das für die Erwärmung des Planeten verantwortlich ist und der menschlichen Gesundheit schadet. Das Ziel dieser Arbeit ist es, den Bedarf der Medienmenge beim Kryogenen Fräsen in Abhängigkeit der Prozessparameter zu bestimmen. Kryogenes Fräsen ist ein hybrides und komplexes Verfahren. Mit Hilfe dieser Studienarbeit können sowohl theoretische als auch praktische Aussagen über den Massenstrom von Kohlendioxid und die Einflussfaktoren auf die Kühlleistung, den Verbrauch und die Wirtschaftlichkeit der CO_2 -Kühlung getroffen werden. Auch eine grobe Abschätzung des Temperaturflusses im System kann vorgenommen werden.

Mit dem mathematischen Modell kann der Massenstrom werkstoffspezifisch berechnet werden und auch mit den Versuchen ist es möglich, konkrete Aussagen über den Einfluss von CO_2 auf das Prozessverhalten (Werkzeugverschleiß, Spanqualität, Oberflächenrauigkeit) zu machen und die Menge an CO_2 mit der beim Bearbeitungsprozess entstehenden Wärme abzuschätzen.

Da die Thermodynamik auch bei der Kryogene Kühlung eine wichtige Rolle spielt, gibt es an jedem Punkt Temperaturgradienten, aber eine grobe Abschätzung über die Menge an Kohlendioxid kann aus dieser Bachelorarbeit entnommen werden. Aus dem Versuch ist ersichtlich, dass die η -Kühlwirkung sehr gering ist. Der Grund dafür ist der Massenstrom von CO_2 , weil er viel höher als erforderlich ist und kann nur in einem bestimmten Bereich des Kanaldurchmessers kontrolliert werden. Durch Verbesserung aller experimentellen Fehler kann der Wert von η optimiert werden. Auf der Basis dieses mathematischen Modells können in Zukunft verschiedene Schlussfolgerungen und Varianten erstellt werden.

Durch die Aufhebung der Beschränkungen des CO₂-Kühlsystems kann ein klarerer Weg zur Bestimmung der CO₂-Menge erprobt werden, Dieses Verfahren wird in der Industrie eingesetzt. Die Forschung konzentrierte sich hauptsächlich auf die Wärme, die durch die Schnittparameter verursacht wird. Eine höhere Genauigkeit kann erreicht werden, wenn andere kleine Elemente wie Material- und Werkzeughärte und Temperaturgradient berücksichtigt werden. Schnitttiefe, Schnittgeschwindigkeit und Vorschub wurden für die Wärme im Prozess genauer betrachtet. Diese drei Schnittgrößen wurden verglichen und hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Prozesswärme bewertet. Weiterhin wurden auch die notwendigen Schnittgrößen wie Schnitt Kräften und Vorschub Kräften genauer untersucht.

Abschließend kann man sagen, dass durch eine genauere Betrachtung des mathematischen Modells, der Datenmatrix und durch Experimente, dieses mathematische Modell weiter ausgearbeitet werden kann (durch Berücksichtigung verschiedener Faktoren und anderer Variablen wie z.B. Werkzeughärte, Winkel, Materialeigenschaften) und ein genauerer CO₂-Massenstrom gefunden werden kann. Kryogene Fräsen haben ein breites Anwendungsspektrum in der Produktionsindustrie. Diese Technologie benötigt nur ein Update mit Kühlsystem und wird am besten mit MMS verwendet.

Literaturverzeichnis

Web-Literatur:

- A Zerspanung, V. Z. (2012, October 23). Cryogenic - Zerspanen mit tiefkaltem Stickstoff. Copyright Verein Zukunftsorientierte Zerspanung.

<https://www.iwu.fraunhofer.de/>

Aufrufdatum: 12.09.2022

- B Kryogene Bearbeitungstechnologie. (2016, August 26). Zerspanungstechnik.de.

<https://www.zerspanungstechnik.de/blog/2016/08/26/kryogene-bearbeitungstechnologie/>

Aufrufdatum: 26.08.2022

- C https://media.dmgmori.com/media/epaper/DMU_DMC_duoBLOCK_EN_12-20/index.html

Aufrufdatum: 27.08.2022

- D <https://www.sandvik.coromant.com/de-de/knowledge/machine-tooling-solutions/tooling-considerations/pages/coolant.aspx>

Aufrufdatum: 27.08.2022

- E Applications of Polyetheretherketone (PEEK). (n.d.).

<https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyetheretherketone-peek-thermoplastic/key-applications>

Aufrufdatum: 19.09.2022

- F Zerspanung, V. Z. (2012, October 23). Cryogenic - Zerspanen mit tiefkaltem Stickstoff. Copyright Verein Zukunftsorientierte Zerspanung.

<https://www.zukunftsorientierte-zerspanung.de/leistungsspektrum/fachinformationen-detailansicht/cryogenic-zerspanen-mit-tiefkaltem-stickstoff.html>

Aufrufdatum: 26.08.2022

- G <http://www.feldschwarm.de/index.php/partner/fraunhofer-iwu>
Aufrufdatum: 12.09.2022
- H Fraunhofer für Kunden - Fraunhofer IWU
Aufrufdatum: 15.09.2022
- I <https://www.iwu.fraunhofer.de/en/publications/news.html>
Aufrufdatum: 12.09.2022
- J <https://www.fraunhofer.de/de/institute/international.html>
Aufrufdatum: 15.09.2022
- K https://www.iwu.fraunhofer.de/de/forschung/leistungsangebot/kompetenzen-von-a-bis-z/Spanen-Abtragen/Spanen/hochleistungsbearbeitung/Fraestechnik-mit-kryogener_Kuehlung.html
Aufrufdatum: 20.11.2022
- L <https://www.makeitfrom.com/material-properties/EN-1.0050-E295-Non-Alloy-Steel>
Aufrufdatum: 21.11.2022
- M <https://www.infratec-infrared.com/downloads/de/thermografie/handbuecher/infratec-handbuch-variocam-hr-head.pdf>
Aufrufdatum: 21.11.2022

Schriftliche Literatur:

1. Fraunhofer IWU, Entwicklung einer flexiblen und effizienten CO₂ - Kühlschmierung für den Einsatz in der Zerspanung
2. Weinert, K. (2013). Trockenbearbeitung und Minimalmengen Kühlschmierung: Einsatz in der spanenden Fertigungstechnik. Springer Publishing.
3. Wissuwa, E. Hochschule Mittweida – – Fakultät Ingenieurwissenschaften - Vorlesungsskript Grundlagen Fertigungstechnik
4. Wissuwa, E. Hochschule Mittweida – Fakultät Ingenieurwissenschaften - Bildmaterial Zur Vorlesung.
5. Wissuwa, E. Hochschule Mittweida - Fakultät Ingenieurwissenschaften Seminar_Abtrenntechnik_Bildmaterial.

6. Wissuwa, E. Hochschule Mittweida - Fakultät Ingenieurwissenschaften
Seminar_Abtrenntechnik
7. Hoffmann J. Messen Nichtelektrischer Größen. Springer Berlin Heidelberg;
1996. doi:10.1007/978-3-662-01173-7
8. Fertigungsverfahren 1. Springer Berlin Heidelberg; 2008. doi:10.1007/978-3-
540-35834-3
9. Denkena B, Tönshoff HK. Spanen. Springer Berlin Heidelberg; 2011.
doi:10.1007/978-3-642-19772-7
10. Förster, A., & Förster, A. (2018). Einführung in die Fertigungstechnik: Lehrbuch
für Studenten ohne Vorpraktikum. Springer Publishing.
11. Davim JP. Machining of Hard Materials. Springer London; 2011.
doi:10.1007/978-1-84996-450-0
12. Dr.-Ing. Bauer R, Hochschule Mittweida -Professur Ressourceneffiziente
Fertigungstechnik, CNC-PROGRAMMIERUNG.
13. Kumar K, Ranjan C, Davim JP. Materials Forming, Machining and Tribology CNC
Programming for Machining. <http://www.springer.com/series/11181>
14. BGI/GUV-I 718 E Minimum Quantity Lubrication for Machining Operations 718
E.; 2010. www.dguv.de
15. Conradie PJT, Oosthuizen GA, Treurnicht NF, al Shaalane & A. OVERVIEW OF
WORK PIECE TEMPERATURE MEASUREMENT TECHNIQUES FOR
MACHINING OF Ti6Al4V #. Vol 23.; 2012. <http://sajie.journals.ac.za>
16. Dietrich, J. (2016). Praxis der Zerspantechnik: Verfahren, Werkzeuge,
Berechnung. Springer Publishing.
17. Radebaugh R. Cryogen (K) (°C) (°R) (°F) Methane Cryogenics *.
www.cryogenicsociety.org.

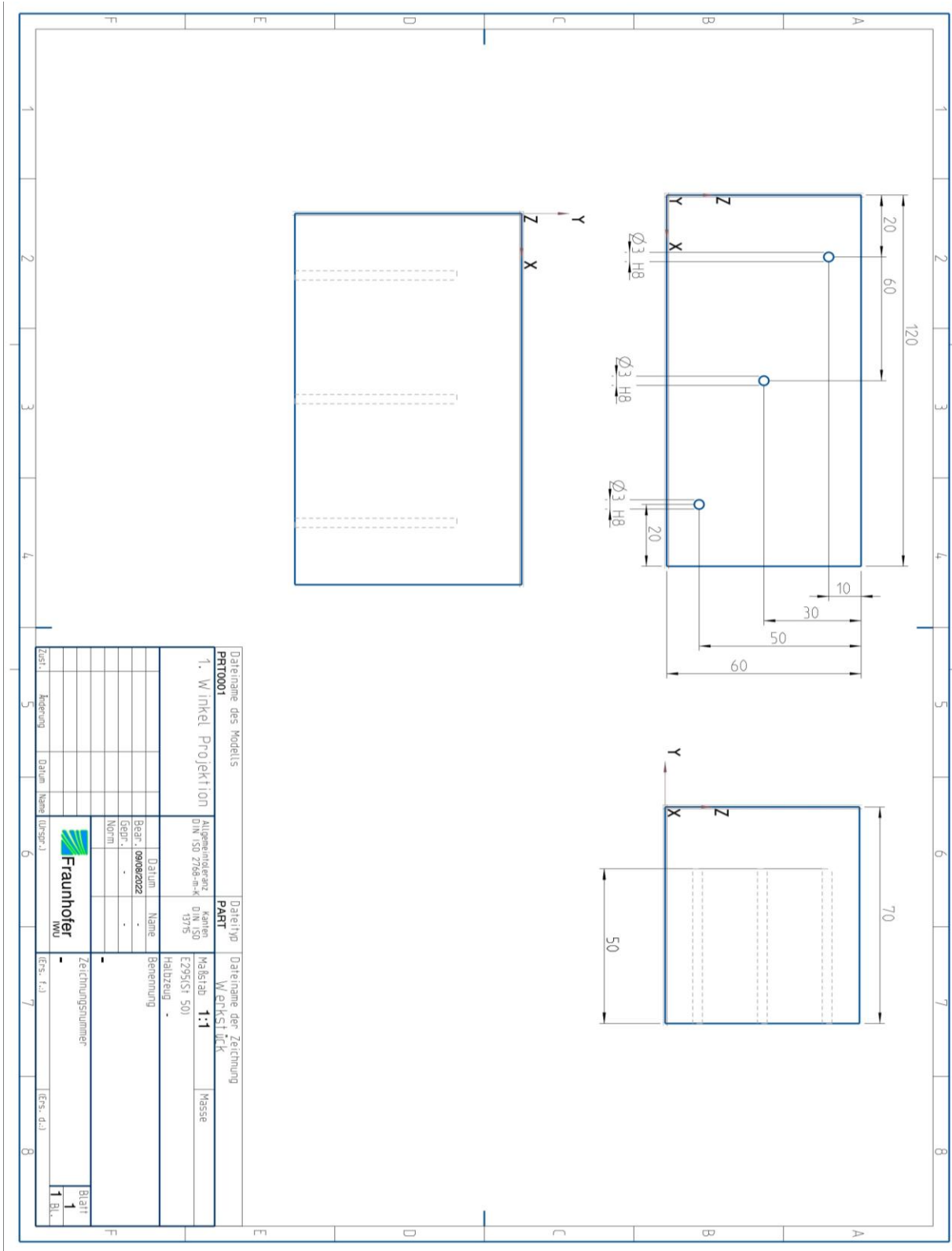
18. Shokrani A, Dhokia V, Muñoz-Escalona P, Newman ST. State-of-the-art cryogenic machining and processing. *Int J Comput Integr Manuf.* 2013;26(7):616-648. doi:10.1080/0951192X.2012.749531
19. Hanenkamp TN, Meier MS. Entwicklung Biobasierter Metallbearbeitungsöle Für Die Kryogene Minimalmengenschmierung.
20. Gross D, FAU University Press ein Imprint der Universität Erlangen-Nürnberg Universitätsbibliothek. Untersuchungen Zur Kohlenstoffdioxidbasierten Kryogenen Minimalmengenschmierung.
21. Dr.-Ing. Bauer R, Hochschule Mittweida -Professur Ressourceneffiziente Fertigungstechnik SPEZIELLE BEARBEITUNGSVERFAHREN.
22. Sanchez JA, Pombo I, Alberdi R, et al. Machining evaluation of a hybrid MQL-CO₂ grinding technology. *J Clean Prod.* 2010;18(18):1840-1849. doi: 10.1016/j.jclepro.2010.07.002
23. Iturbe A, Hormaetxe E, Garay A, Arrazola PJ. Surface Integrity Analysis when Machining Inconel 718 with Conventional and Cryogenic Cooling. In: *Procedia CIRP.* Vol 45. Elsevier B.V.; 2016:67-70. doi: 10.1016/j.procir.2016.02.095
24. Sartori S, Ghiotti A, Bruschi S. Hybrid lubricating/cooling strategies to reduce the tool wear in finishing turning of difficult-to-cut alloys. *Wear.* 2017;376-377:107-114. doi:10.1016/j.wear.2016.12.047
25. Heisel U, Lutz M, Spath D, Wassmer R, Walter U. Application of Minimum Quantity Cooling Lubrication Technology in Cutting Processes.
26. Tapoglou, N., Lopez, M. I. A., Cook, I., & Taylor, C. M. (2017). Investigation of the Influence of CO₂ Cryogenic Coolant Application on Tool Wear. *Procedia CIRP*, 63, 745–749. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.35>
27. Bergs, T., Pušavec, F., Koch, M., Grguraš, D., Döbbeler, B., & Klocke, F. (2019d). Investigation of the Solubility of Liquid CO₂ and Liquid Oil to Realize an Internal Single Channel Supply in Milling of Ti6Al4V. *Procedia Manufacturing*, 33, 200–207. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.04.024>

28. Sadik, M. I., Isakson, S., Malakizadi, A., & Nyborg, L. (2016). Influence of Coolant Flow Rate on Tool Life and Wear Development in Cryogenic and Wet Milling of Ti-6Al-4V. *Procedia CIRP*, 46,91-94. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.014>
29. Jerold BD, Kumar MP. Machining of AISI 316 stainless steel under carbon-dioxide cooling. *Materials and Manufacturing Processes*. 2012;27(10):1059-1065. doi:10.1080/10426914.2011.654153
30. Fuchs M, Bräunig M, Regel J, Dix M. Sensory Milling Chuck for Correction of Thermal Tool Deformation by In-process Temperature Measurement and Correction Value Calculation. In : ; 2022:160-168. doi:10.1007/978-3-030-78424-9_18
31. Fraunhofer IWU, Funktionsschema CO2-Anlage ppt.
32. Operations Manual Coolant-Lubricant Spray System ChilAire™ Series EI3100 ChilAire™.; 2012. www.ChilAire.com
33. Krekeler K. Die Zerspanbarkeit Der Werkstoffe. Vol 61. Springer Berlin Heidelberg; 1943. doi:10.1007/978-3-642-90877-4
34. Ilchner B, Singer RF. *Werkstoff-Wissenschaften Und Fertigungstechnik*.
35. Davim JP. *Materials Forming, Machining and Tribology Machining of Titanium Alloys*. <http://www.springer.com/series/11181>
36. Li Y, Cheng X, Ling S, Zheng G, Liu H, He L. Study of milling process basics for the biocompatible PEEK material. *Mater Res Express*. 2020;7(1). doi:10.1088/2053-1591/ab6a5a
37. *Werkstofftechnik*. www.hanser-elibrary.com
38. Jacobsen, R. T., Penoncello, S. G., & Lemmon, E. W. (2013). *Thermodynamic Properties of Cryogenic Fluids (International Cryogenics Monograph Series) (Softcover reprint of the original 1st ed. 1997)*. Springer.

39. Leachman JW, Jacobsen RT, Lemmon EW, Penoncello SG, van Sciver SW, Jeong S. Thermodynamic Properties of Cryogenic Fluids International Cryogenics Monograph Series Series Editors. <http://www.springer.com/series/6086>
40. Schmidt, A. (2019). Technical Thermodynamics for Engineers: Basics and Applications (1st ed. 2019). Springer.
41. Demtröder W. Undergraduate Lecture Notes in Physics. Mechanics and Thermodynamics <http://www.springer.com/series/8917>
42. Rattat C. CNC-Fräsen Für Maker Und Modellbauer – Grundlagen – Technik – Praxis.
43. Hirsch, A. (2013). Werkzeugmaschinen Grundlagen: Lehr- und Übungsbuch. Springer Vieweg.
44. Atkins, P., & Paula, D. J. (2006). Physical Chemistry (8th ed.). W. H. Freeman.
45. Krieg MC, Bilz M, Mankiewicz J. Trends in der Industriellen Teilereinigung - Welches Potenzial hat Kohlendioxid? Chem Ing Tech. 2009;81(11):1845-1851. doi:10.1002/cite.200900113
46. Eric, H. (n.d.). Grundlagenuntersuchungen zur Ermittlung verbrauchs- und verfahrensangepasster Einstellparameter für die CO₂-Kühlung. Technische Universität Chemnitz.
47. Pohl, R. W., Lüders, K., & Pohl, R. O. (2004). Pohls Einführung in die Physik: Mechanik, Akustik und Wärmelehre (German Edition) (19., neu bearb. u. mit Kommentaren versehene Auflage). Springer.
48. Rattat, C. (2016). CNC-Fräsen für Maker und Modellbauer: Grundlagen - Technik - Praxis. Dpunkt.Verlag GmbH.

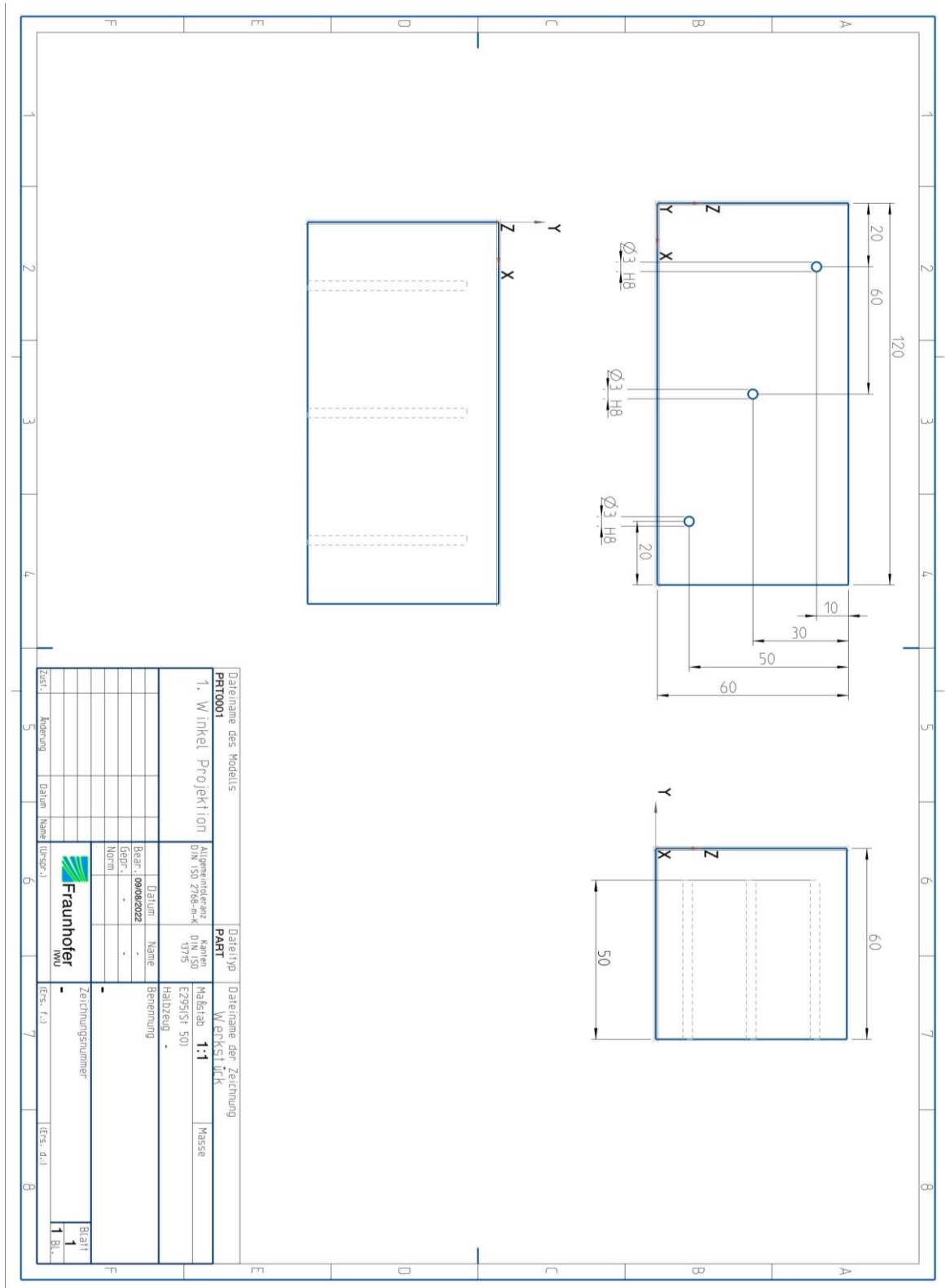
Anlagen

Anlage 1:




Technische Zeichnung des E295-Blocks für Versuche zur a_p - \dot{V} Änderung


Anlage 2:




Technische Zeichnung des E295-Blocks für Versuche zur v_c-f Änderung


Anlage 3:





HOLEX. VHM-Schaftfräser HPC mit Innenkühlung




Universal
VHM




DIN
6527




Typ
N




e8




f8




Z
4



G2.5
Dmax



35°




HPC

Ausführung: Mit innerer Kühlmittelzufuhr, für sichere Spanabfuhr.


20 3016 – Toleranz: Größe Nenn-Ø D_c = e8.
Mit 38°-Spirale.
Mit Wuchtgüte G 2,5.

20 3017 – Toleranz: Größe Nenn-Ø D_c = f8.
Mit 35°-Spirale.
Spezielle TSi-Beschichtung.



▼ Freischliff

20 3016



▼ Freischliff

20 3017

Vc = m/min	Alu		Alu Guss		INOX		INOX		TI		GG(G)		CuZn		Graphit GFK		Uni		f _s	
	Kunststoffe	Alu	<20% Si	>10% Si	<500 N	<750 N	<900 N	>900 N	>900 N	>850 N	K	S	N	N	N	O	max	min	INOX	max
20 3016 –	N	N	N	N	P	P	P	P	M	M	S	N	N	N	O	•	•	•	•	•
20 3017 –					P	P	P	P	M	M	S	N	N	N	O	•	•	•	•	•

Ø D _c	20 3016		20 3017		L _s	L ₄	D ₄	L _{ges}	h ₆	45°	f _s	f _s
	HOLEX VHM-Fräser mit Innenkühlung HPC TAIN		HOLEX VHM-Fräser mit Innenkühlung HPC TSi									
4	63,20	—	11	17	3,8	5,7	6	0,1	0,012	0,015	0,012	0,015
5	63,20	—	13	19	4,8	5,7	6	0,1	0,025	0,025	0,025	0,025
6	66,40	56,80	13	19	5,8	5,7	6	0,1	0,025	0,030	0,025	0,030
8	89,60	72,80	21	25	7,7	6,3	8	0,2	0,025	0,040	0,025	0,040
10	127,-	88,60	22	30	9,7	7,2	10	0,2	0,040	0,045	0,040	0,045
12	170,50	117,-	26	36	11,6	8,3	12	0,3	0,040	0,050	0,040	0,050
16	310,-	225,-	36	42	15,5	9,2	16	0,3	0,050	0,055	0,050	0,055
20	444,-	334,-	41	52	19,5	10,4	20	0,3	0,070	0,080	0,070	0,080

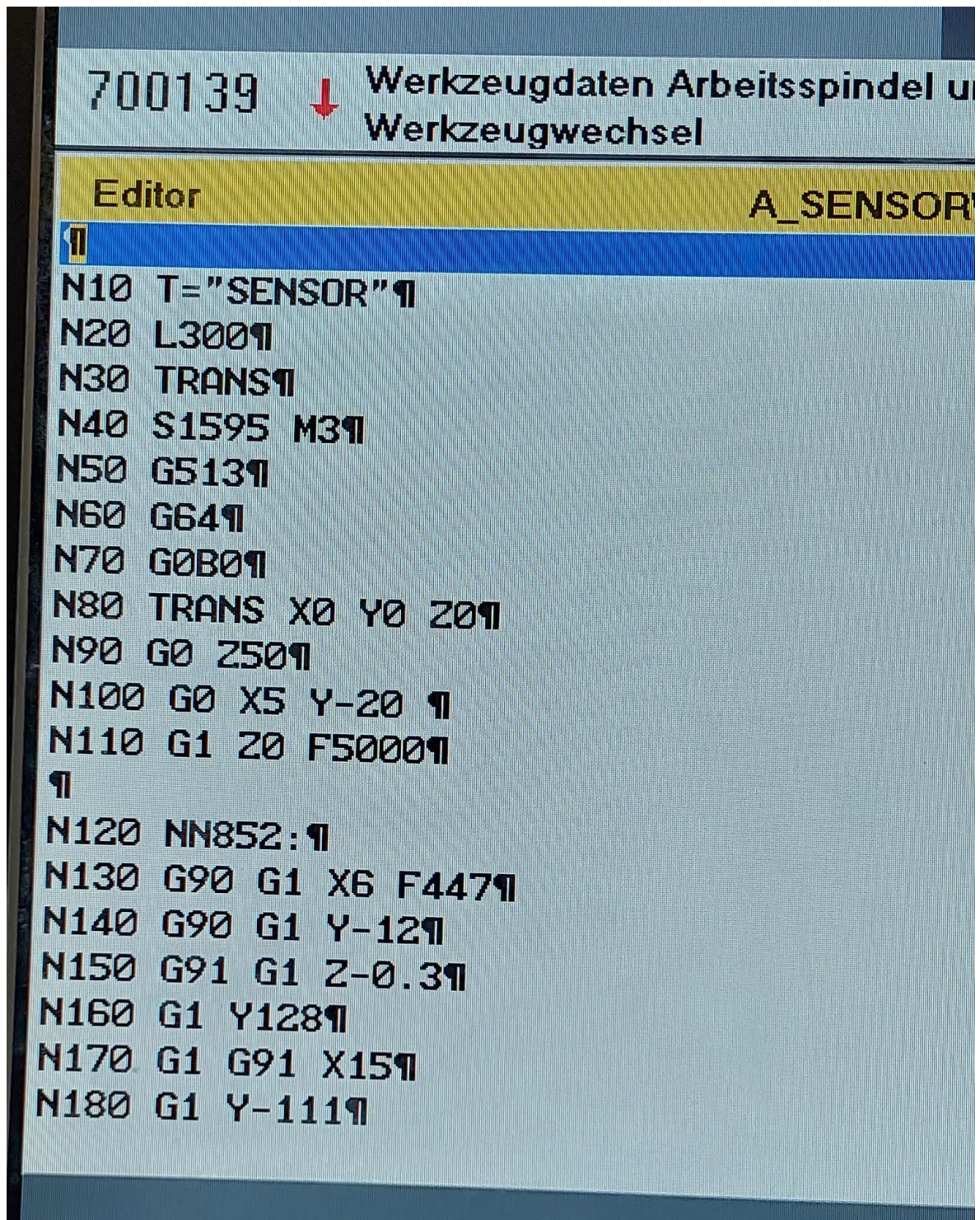
Technische Daten des Werkzeugs

Anlage 4:



Optische Meßgeräte

Anlage 5:



The screenshot shows a CNC control interface. At the top, the program number '700139' is displayed next to a red downward arrow. To the right, the text 'Werkzeugdaten Arbeitsspindel u' and 'Werkzeugwechsel' is visible. Below this is a yellow bar with the word 'Editor' on the left and 'A_SENSOR' on the right. The main area contains a list of G-code lines from N10 to N180. The lines are as follows:

```
N10 T="SENSOR"
N20 L300
N30 TRANS
N40 S1595 M3
N50 G513
N60 G64
N70 G0B0
N80 TRANS X0 Y0 Z0
N90 G0 Z50
N100 G0 X5 Y-20
N110 G1 Z0 F5000
N120 NN852:
N130 G90 G1 X6 F447
N140 G90 G1 Y-12
N150 G91 G1 Z-0.3
N160 G1 Y128
N170 G1 G91 X15
N180 G1 Y-111
```

CNC-Programm für Versuche

Anlage 6:

Werkstoffe	$k_{c1.1}$ N/mm ^{2-mc}	1-m _c	$k_{f1.1}$ N/mm ^{2-mf}	1-m _f	$k_{p1.1}$ N/mm ^{2-mp}	1-m _p
E295 (St 50)	1990	0,74	351	0,2987	274	0,5089
E360 (St 70)	2260	0,70	364	0,3835	311	0,5067
C 15	1820	0,78	333	0,1993	260	0,4648
C45E (Ck 45)	2220	0,86	343	0,3248	263	0,5244
C60E (Ck 60)	2130	0,82	347	0,2877	250	0,5870
15 Cr Mo 5	2290	0,83	290	0,2488	232	0,4430
16 Mn Cr 5	2100	0,74	391	0,3024	324	0,5410
18 Cr Ni 6	2260	0,70	326	0,2750	247	0,5352
20 Mn Cr 5	2140	0,75	337	0,3190	246	0,4778
30 Cr Ni Mo 8	2600	0,80	355	0,3844	255	0,5657
34 Cr Mo 4	2240	0,79	337	0,3190	237	0,3715
37 Mn Si 5	2260	0,80	259	0,3622	277	0,7432
42 Cr Mo V 4	2500	0,74	334	0,3295	271	0,5239
50 Cr V 4	2220	0,74	317	0,2345	315	0,6106
EN-GJL-200	1020	0,75	240	0,3010	178	0,5400
EN-GJL-250	1160	0,74	251	0,3020	190	0,5410
EN-GJS-600-15	1480	0,83	290	0,2400	240	0,5657

Spezifische Schnitt- Vorschub und Passivkräfte

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida,

Abhishek Arvindhaj, Borisagar