
Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben InWeT

Bewilligungsempfänger: Technische Universität Berlin
Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF)
FG Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik
Pascalstr. 8-9, 10587 Berlin

Kooperationspartner: DIAMANT-GESELLSCHAFT TESCH GMBH (TESCH)
Carl-Goerdeler-Str. 14, 71636 Ludwigsburg

EMAG MASCHINENFABRIK GMBH (EMAG)
Austraße 24, 73084 Salach

Sachtitel: Innengekühltes Werkzeugsystem
für die Trockenbearbeitung (InWeT)

Berichtsart: Abschlussbericht

Aktenzeichen: 34770/01-31
gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Verfasser: Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann

Ort / Datum: Berlin, den 13.09.2021

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	34770/01	Referat	31	Fördersumme	188.760,00 €
Antragstitel	Innengekühltes Werkzeugsystem für die Trockenbearbeitung (InWeT)				
Stichworte	Verfahren, Verfahrenstechnik/Prozesse Kreislauf, Kühlung, Metall, Schadstoff, Schmierstoff				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
24 Monate	01.07.2019	30.06.2021			
Zwischenbericht	Juli 2019 bis Juni 2020	erstellt am:	26.06.2020		
Abschlussbericht	Juli 2021 bis Juni 2021	erstellt am:	13.09.2021		
Bewilligungsempfänger	Technische Universität Berlin Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb FG Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik Sekretariat PTZ 1 Pascalstr. 8 - 9 10587 Berlin			Tel.:	+49 (0) 30 314 23349
				Fax:	+49 (0) 30 314 25895
				Projektleitung Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. E. Uhlmann	
				Bearbeiter Alle Kooperationspartner	
Kooperationspartner	Diamant-Gesellschaft Tesch GmbH, Ludwigsburg EMAG Maschinenfabrik GmbH, Salach				

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Das Hauptziel des Forschungsvorhabens ist ein Werkzeugsystem mit geschlossener Innenkühlung für die industrielle Anwendung zu konzipieren und umzusetzen. Das Werkzeugsystem besteht aus Wendeschneidplatte (WSP), Werkzeughalter, Werkzeugaufnahme mit einem an der Werkzeugmaschine angeschlossenen Kühlkreislauf sowie Steuer- und Analyseeinheit. Bisherige Erkenntnisse derartiger Werkzeugsysteme basieren lediglich auf Untersuchungen im Labormaßstab. WSP welche auf Anforderungen an geschlossenen innengekühlten Werkzeugsysteme angepasst sind, werden derzeit nicht auf dem Markt angeboten. Auch fehlt es an Werkzeughaltern, welche den Anschluss des geschlossen-innengekühlten Werkzeugsystems an eine Werkzeugmaschine ermöglichen. Zudem befinden sich derzeit Kühlperipherie und Steuerungseinheit aus den eigenen Vorarbeiten außerhalb der Werkzeugmaschine und sind in dieser nicht integrierbar. Die Tauglichkeit eines geschlossen-innengekühlten Werkzeugsystems im industriellen Umfeld ist derzeit nicht gegeben.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Zur erfolgreichen Bearbeitung des Forschungsvorhabens waren mehrere Arbeitspakete (AP) notwendig, welche inhaltlich die Entwicklung, die Fertigung und die Erprobung des geschlossen-innengekühlten Werkzeugsystems umfassten.

In AP A erfolgte die Konzeption des geschlossen-innengekühlten Werkzeugsystems auf Grundlage der durch EMAG und TESCH aufgestellten, industriellen Rahmenbedingungen. Hierbei erfolgte die Definition des Anwendungsgebiets, der Werkzeugmaschinenintegration, der Kühlflüssigkeit sowie die Konzeption notwendiger Komponenten.

Die Werkzeugentwicklung erfolgte in AP B, welche das thermo-mechanische Lastkollektiv während des Außenlängs-Runddrehens für variierende Prozess- und Geometrieparameter simulativ ermittelte. In diesem Zusammenhang konnten Konzepte zum effizienten Wärmetransport innerhalb des Kühlkörpers entwickelt und sich daraus ableitende Werkzeuggeometrien gefertigt werden.

Der Fokus in AP C lag in der konstruktiven Auslegung der Fluidzufuhr innerhalb des Werkzeughalters und dessen Werkzeugaufnahme. Die Entwicklung der Komponenten basiert auf Ergebnissen numerischer Festigkeits- und Strömungsanalysen. Darüber hinaus wurden bestehende Werkzeugmaschinenkomponenten für das geschlossen-innengekühlte Werkzeugsystem modifiziert, um die Möglichkeit der Aufnahme von Messtechnik erweitert und gefertigt.

Die Maschinenintegration seitens EMAG wurde in AP D durchgeführt. Unter Verwendung der numerischen und konstruktiven Ergebnisse wurden sowohl hydraulische als auch elektrische Komponenten ausgelegt und in eine bestehende Werkzeugmaschine sowie in dessen Steuerung integriert. Zusätzlich erfolgte die Auslegung von Kraft- und Temperaturmesstechnik.

Eine finale Erprobung und eine Evaluierung des geschlossen-innengekühlten Werkzeugsystems erfolgten in AP E auf Grundlage technologischer Untersuchungen. Es wurden sowohl die Einzelkomponenten durch entwickelte Versuchsstände erprobt und die Vorteile geschlossen-innengekühlter Werkzeuge im Zerspanprozess durch Aufnahme der Fluidtemperaturen T_F , Zerspankraftkomponenten F_x und der maximalen Verschleißmarkenbreite VB_{max} ermittelt.

Ergebnisse und Diskussion

Innerhalb des Forschungsvorhabens konnte ein geschlossen-innengekühltes Werkzeugsystem erfolgreich entwickelt werden. Das Funktionsmuster stellt auf Grund der geschlossenen Innenkühlung erstmals ein industriell verwertbares Gesamtsystem dar, welches keine signifikanten Nachteile gegenüber konventionellen Werkzeugsystemen aufweist. Innerhalb des Forschungsvorhabens wurden ferner folgende Erkenntnisse erzeugt.

- Das geschlossen-innengekühlte Werkzeugsystem ist sowohl für konventionelle Vierkant- als auch für Capto®-Werkzeughalter einsetzbar. Darüber hinaus sind unterschiedliche Dicken der Wendeschneidplattenspezifikation CNMN12* einsetzbar.
- Der Einsatz von Wasser als Kühlfluid stellt die wirtschaftlichste und nachhaltigste Lösung innerhalb einer Innenkühlung dar. Jedoch sind Korrosionsinhibitoren für das aktuelle Funktionsmuster notwendig, welche die thermischen Eigenschaften nachteilig beeinflussen.
- Der Temperatureinfluss des Kühlfluids ist im Hinblick auf die Temperaturdifferenz ΔT des Werkzeugs nur bei niedrigen Volumenströmen \dot{V} von Relevanz. Die Erhöhung des Volumenstroms \dot{V} innerhalb des im Forschungsvorhabens festgelegten Bereichs ist energiesparender und effektiver als die Reduzierung der Kühlfluidtemperatur T_F .
- Die Messung der eingangs- und ausgangsseitigen Fluidtemperatur T_{ein} und T_{aus} gibt Aufschluss über den Werkzeugeingriff sowie dessen Verschleiß.
- Technologische Untersuchungen mit geschlossen-innengekühlten Werkzeugen zeigen eine Reduzierung der Werkzeugtemperatur T_{WZ} sowie ein schnelleres Erreichen des thermischen Gleichgewichts gegenüber ungekühlten Werkzeugen.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Im Rahmen des Forschungsvorhabens konnte bisher eine Publikation veröffentlicht werden:

Uhlmann, E.; Meier, P.: Numerical investigation on the process behavior of a closed-loop internal cooling system for turning operations. In: Procedia CIRP. Proceedings of the 18th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations.; Band N. N.. Hrsg.: Govekar, E. Amsterdam: Elsevier, 2021, Manuskript eingereicht.

Darüber hinaus ist es geplant, die Resultate der Zerspanuntersuchungen am IWF in einer weiteren Publikation darzulegen und innerhalb institutseigener Industrie-Arbeitskreise vorzustellen.

Auf Grund der pandemiebedingten Einschränkungen, welche durch COVID-19 verursacht wurden, war es dem Projektkonsortium nicht möglich, die im Forschungsvorhaben erzielten Ergebnisse auf Fachmessen vorzustellen. Es ist jedoch zukünftig durch EMAG geplant, das einsatzfähige Funktionsmuster bei Kunden und auf Fachmessen zu bewerben.

Fazit

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde ein geschlossen-innengekühltes Werkzeugsystem mit Hilfe der methodischen Produktentwicklung nach VDI 2221 entwickelt. Im Vordergrund stand die Realisierung einer Innenkühlung für die Drehbearbeitung mit WSP, welche unter industriellen Rahmenbedingungen einsetzbar ist. Die hierbei abgeleiteten Anforderungen, wie eine hohe Kühleffizienz, niedrige Fertigungskosten, Kompatibilität durch standardisierte Schnittstellen und keine negative Beeinträchtigung bestehender Systeme konnte erfolgreich umgesetzt werden. So wurden unterschiedliche Varianten des Werkzeugsystems realisiert, welche eine externe und interne Kühlfluidführung für konventionelle Vierkant- als auch für Capto®-Werkzeughalter ermöglicht. Darüber hinaus sind unterschiedliche WSP-Dicken und Spannkonzepete einsetzbar. Der modulare Aufbau des innengekühlten Gesamtsystems ermöglicht den beteiligten Kooperationspartnern hierbei eine einfache Weiterentwicklung im Hinblick auf zusätzliche Geometriespezifikationen der WSP. Darüber hinaus wurde eine nahtlose Integration der ausgelegten Werkzeugperipherie, der Messtechnik innerhalb der Werkzeugmaschine und dessen Steuerung erfolgreich umgesetzt. Im Ergebnis kann festgestellt werden, dass infolge einer thermischen Lastreduzierung der Einsatz des entwickelten geschlossen-innengekühlten Werkzeugsystems eine Werkzeugstandzeiterhöhung im Bereich der Weich- und Hartbearbeitung von Stahl ermöglicht. Aus ökologischer Sicht ist zusätzlich von reduzierten CO₂-Emissionen durch den Einsatz von WSP-Dicken mit $s < 4,76$ mm und einer Erhöhung des Standvolumens V_T von bis zu 35 % unter Verwendung der Innenkühlung auszugehen.

Inhaltsverzeichnis

0	Verzeichnisse	III
0.1	Formel- und Kurzzeichen	III
0.2	Bildverzeichnis	VII
0.3	Tabellenverzeichnis	IX
1	Zusammenfassung	1
2	Einleitung	3
3	Hauptteil	4
3.1	Arbeitspaket A - Konzeptionierung des Werkzeugsystems.....	4
3.1.1	A1 - Definition der Anforderungen an das Gesamtsystem.....	4
3.1.2	A2 - Entwickeln von Teilkonzepten für die Wendeschneidplatte, Werkzeughalter und -aufnahme, Kühlperipherie sowie deren Kontaktverbindung	7
3.1.3	A3 - Definition der zu untersuchenden Kühlfluide	16
3.2	Arbeitspaket B - Werkzeugentwicklung.....	17
3.2.1	B1 - Werkzeug- und Werkstoffmodellierung zur Prozesssimulation	17
3.2.2	B2 - Prozess- und geometrieabhängige Werkzeugbelastungssimulation	18
3.2.3	B3 - Entwicklung der Kontaktgeometrie zum Werkzeughalter	20
3.2.4	B4 - Fertigung der Werkzeuge.....	22
3.3	Arbeitspaket C - Entwicklung von Werkzeughalter und -aufnahme.....	22
3.3.1	C1 - Entwicklung der geschlossenen Kontaktgeometrie zur Wendeschneidplatte	22
3.3.2	C2 - Entwicklung des Strömungsverlaufs von Kühlmittelzu- und -abfuhr für den effektiven Wärmeaustausch durch Einsatz von CFD.....	25
3.3.3	C3 - Entwicklung des Anschlusses an das Hydraulik- und Messtechniksystem.....	30
3.3.4	C4 - Entwicklung der Werkzeugaufnahme mit integrierter Messtechnik und Hydraulik	31
3.3.5	C5 - Fertigen des Werkzeughalters und der -aufnahme.....	31
3.4	Arbeitspaket D - Maschinenintegration des Kühlkreislaufs	31
3.4.1	D1 - Auslegung der Hydraulikkomponenten	31
3.4.2	D2 - Entwicklung eines Hydraulik- und Elektroplans	32
3.4.3	D3 - Anpassung der Werkzeugmaschine und Integration der Hydraulikkomponenten	33
3.4.4	D4 - Auslegung und Integration der Messtechnik zur Bestimmung von Temperatur und Kraftwerten	33

3.4.5	D5 - Steuerungsintegration des Werkzeugsystems	35
3.5	Arbeitspaket E - Erprobung und Evaluierung.....	36
3.5.1	E1 - Erprobung der Einzelkomponenten/Schnittstellen	36
3.5.2	E2 - Zerspanungsuntersuchung im Labormaßstab	38
3.5.3	E3 - Bewertung der Leistungsfähigkeit/des Risikos	43
4	Fazit	48
5	Literaturverzeichnis.....	49
6	Erklärung zur Einreichung des Abschlussberichts	52
7	Anlagenverzeichnis	VII

0 Verzeichnisse

0.1 Formel- und Kurzzeichen

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
a	Wh cm^{-3}	spezifischer Energieverbrauch
a_L	mm	Seitenlänge
a_p	mm	Schnitttiefe
a_w	mm	Höhe des Klemmhalters
b_F	μm	Fasenbreite
c	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	Wärmekapazität
d_F	mm	Futterdurchmesser
e_{CO_2}	g Stk.^{-1}	spezifische CO_2 -Emission
E	W	Energie
E_M	MPa	Elastizitätsmodul
F_c	N	Schnittkraft
F_x	N	Zerspankraftkomponenten
f	mm	Vorschub
g_{zul}	mm	zulässiges Spaltmaß
h	mm	Höhe
k	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	Wärmeleitfähigkeit
k_{DMS}	1	k-Faktor
KT_{max}	μm	maximale Kolktiefe
L_f	mm	Eingriffsweg in Vorschubrichtung
l_K	μm	Kontraktionslänge
l_s	mm	Abstand zur Werkzeugschneide
m	kg	Masse
m_R	1	Reibfaktor
m_{KSS}	kg	Masse des Kühlschmierstoffs
n_{max}	min^{-1}	maximale Drehzahl
n_p	min^{-1}	Pumpendrehzahl
m_{HW}	t	Masse des produzierten Hartmetalls
m_{St}	t	Masse des produzierten Rohstahls

m_{WSP}	g	Masse der Wendeschneidplatte
$P_{A,ED40}$	kW	Antriebsleistung bei 40 % Einschaltdauer
$P_{A,ED100}$	kW	Antriebsleistung bei 100 % Einschaltdauer
P_{ges}	W	Gesamtleistung
P_P	W	Pumpenleistung
P_{KA}	W	Leistung des Kühlaggregats
Δp	bar	Druckverlust
p	bar	Druck
p_{WZ}	€	Werkzeugkosten
\dot{Q}	W	Wärmestrom
R	Ω	Elektrischer Widerstand
R_a	μm	arithmetischer Mittelwert der Profilordinaten
R_m	MPa	Zugfestigkeit
R_z	μm	gemittelte Rautiefe
r_β	μm	Schneidkantenradius
s	mm	Dicke der Wendeschneidplatte
s_p	μm	Spalt
ShA	1	Shore-Härte Typ A
T	$^{\circ}C$	Temperatur
T_{aus}	$^{\circ}C$	Fluidtemperatur am Ausgang
T_{ein}	$^{\circ}C$	Fluidtemperatur am Eingang
T_F	$^{\circ}C$	Fluidtemperatur
T_{HE}	$^{\circ}C$	Temperatur des Heizelements
T_{max}	$^{\circ}C$	maximale Temperatur
T_{VB}	min	Standzeit
T_{WZ}	$^{\circ}C$	Werkzeugtemperatur
$T_{WZ,max}$	$^{\circ}C$	maximale Werkzeugtemperatur
T_{WZU}	$^{\circ}C$	Temperatur der Werkzeugunterseite
ΔT	K	Temperaturdifferenz
t_L	s	Ladezeit
t_s	min	Schnittzeit

U_B	mV	Brückenspannung
U_S	V	Speisespannung
u	μm	Gesamtverformung
V_T	cm^3	Standvolumen
V_w	l	Volumen des Wassers
\dot{V}	l min^{-1}	Volumenstrom
VB	mm	Verschleißmarkenbreite
VB_{max}	mm	maximale Verschleißmarkenbreite
v_c	m min^{-1}	Schnittgeschwindigkeit
W_c	kWh	Schnittarbeit
X	mm	Höhe
Y	MPa	Elastizitätsmodul
Z	mm	Länge

Griechische
 Formelzeichen

α_0	°	Orthogonalfreiwinkel
α_F	°	Fasenwinkel
Φ	°	Scherwinkel
κ	°	Einstellwinkel
ν	Pa s	kinematische Viskosität
ρ	g cm^{-3}	Dichte
γ_x	°	Wirkspanwinkel

Kurzzeichen	Bezeichnung
100Cr6	hochlegierter Wälzlagerstahl
Al	Aluminium
C	Kohlenstoff
CBN	kubisches Bornitrid
CNC	Computerized Numerical Control
Cf53	Vergütungsstahl
Co	Cobalt

CO ₂	Kohlenstoffdioxid
Cr	Chrom
DMS	Dehnmessungsstreifen
HW	Hartmetall auf Basis von Wolframcarbid
KSS	Kühlschmierstoff
Mn	Mangan
Mo	Molybdän
P	Phosphor
Si	Silizium
Ti	Titan
TiC	Titancarbid
Ti-6Al-4V	Titanlegierung
UF	ultrafein
V	Vanadium
WC	Wolframcarbid
WO ₃	Wolframtrioxid
WSP	Wendescheidplatte

0.2 Bildverzeichnis

<u>Bild 1-1:</u>	Ablaufplan der Arbeitspakete im Forschungsvorhaben.....	1
<u>Bild 3-1:</u>	Schematische Darstellung des innengekühlten Werkzeugsystems	4
<u>Bild 3-2:</u>	Vertikaldrehmaschine VLC 200 GT der Fa. EMAG MASCHINENFABRIK GMBH, Salach.....	5
<u>Bild 3-3:</u>	Schematische Darstellung der Vorgehensweise sowie der Arbeitsergebnisse nach VDI 2221-1	7
<u>Bild 3-4:</u>	Funktionsstruktur eines konventionellen Werkzeugsystems sowie resultierende Teilprobleme	9
<u>Bild 3-5:</u>	Material- und Energiefluss der Funktion "Zerspanen" auf Basis einer Blackbox.....	10
<u>Bild 3-6:</u>	Skizze der ersten Lösung für das Teilproblem „Hohe Temperaturen“	10
<u>Bild 3-7:</u>	Skizze der zweiten Lösung für das Teilproblem „Hohe Temperaturen“	11
<u>Bild 3-8:</u>	Skizze der dritten Lösung für das Teilproblem „Hohe Temperaturen“	11
<u>Bild 3-9:</u>	Morphologischer Kasten zur Bildung von Vorentwürfen	12
<u>Bild 3-10:</u>	Erster Vorentwurf; a) Schnittansicht; b) Explosionsansicht	13
<u>Bild 3-11:</u>	Zweiter Vorentwurf; a) Schnittansicht; b) Explosionsansicht	14
<u>Bild 3-12:</u>	Dritter Vorentwurf; a) Schnittansicht; b) Explosionsansicht	14
<u>Bild 3-13:</u>	Zweistufige Vorgehensweise zur numerischen Auslegung der Innen- kühlung sowie zur Prüfung eines belastungsgerechten Werkzeughalters	17
<u>Bild 3-14:</u>	Temperaturverteilung im Span sowie temperaturabhängige Kontaktzone auf dem Werkzeug während der spanenden Bearbeitung von 100Cr6	19
<u>Bild 3-15:</u>	Ergebnis der Belastungssimulationen für Cf53 und 100Cr6 unter variierenden Prozessparametern; a) resultierende Schnittkraft F_c ; b) maximale Werkzeugtemperatur T_{WZ} ; c) analytischer und numerischer Wärmestrom Q im Bereich der Kontaktzone.....	20
<u>Bild 3-16:</u>	Darstellung unterschiedlicher Varianten des Kühlkörpers sowie favorisierte Lösung	21
<u>Bild 3-17:</u>	Lineare FEM-Simulationen zur Bewertung von Gesamtverformung u und Spalt s_p	24
<u>Bild 3-18:</u>	Schnittdarstellung und exemplarische Stückliste des innengekühlten Gesamtsystems mit externer Kühlfluidführung	24
<u>Bild 3-19:</u>	Darstellung des innengekühlten Gesamtsystems mit interner Kühlfluidführung	25
<u>Bild 3-20:</u>	Stationäre Simulationsergebnisse des thermischen Verhaltens von WSP unter definiertem Wärmestrom Q in der Kontaktzone.....	26
<u>Bild 3-21:</u>	Geometriemodell zur Untersuchung des Einsatzverhaltens der Innenkühlung im Bereich des Werkzeughalters mit den relevanten Eingangs- und Zielgrößen.....	26

<u>Bild 3-22:</u>	Analytischer und numerischer ermittelter Druckverlust Δp in Abhängigkeit des Volumenstroms \dot{V} sowie der Strömungsführung27
<u>Bild 3-23:</u>	Numerische ermittelte Temperaturdifferenz ΔT in Abhängigkeit des Volumenstroms \dot{V} sowie der Fluidtemperatur am Eingang T_{ein}28
<u>Bild 3-24:</u>	Numerische ermittelte Temperaturdifferenz ΔT in Abhängigkeit des eingesetzten Kühlfluids28
<u>Bild 3-25:</u>	Komponenten des innengekühlten Werkzeugsystems am Blockstahl- halter; a) Werkzeughalter und Kühlleitungen; b) Temperaturmesssystem30
<u>Bild 3-26:</u>	Modifizierter Spanneinsatz zur Aufnahme von Capto®-Werkzeughaltern31
<u>Bild 3-27:</u>	Hydraulik- und Elektroplan des überarbeiteten IWF-Versuchsstands32
<u>Bild 3-28:</u>	Integration des innengekühlten Werkzeugsystems am IWF.....33
<u>Bild 3-29:</u>	Verhalten der eingangs- und ausgangsseitigen Temperatur T_{ein} und T_{aus} beim Außenlängs-Runddrehen mit Innenkühlung ...34
<u>Bild 3-30:</u>	Werkzeughalter mit wheatstonescher Messbrücke; a) Schaltbild; b) Funktionsmuster34
<u>Bild 3-31:</u>	DMS-Verhalten während des Außenlängs-Runddrehens35
<u>Bild 3-32:</u>	Darstellung der hydraulischen Komponenten sowie der Druck- und der Temperatursensoren des Prüfstands36
<u>Bild 3-33:</u>	Zeitliches Temperaturverhalten von WSP im ungekühlten und gekühlten Zustand37
<u>Bild 3-34:</u>	Werkzeugtemperatur T_{WZ} unter Einsatz variierender Schnittgeschwindigkeiten v_c in Abhängigkeit des Volumenstroms \dot{V} für C45E38
<u>Bild 3-35:</u>	Werkzeugtemperatur T_{WZ} unter Einsatz variierender WSP-Dicken s in Abhängigkeit des Volumenstroms \dot{V} für C45E39
<u>Bild 3-36:</u>	Fluidtemperaturdifferenz ΔT_F unter Einsatz variierender Schnittgeschwindigkeiten v_c in Abhängigkeit der WSP-Dicke s für C45E39
<u>Bild 3-37:</u>	Verschleißmarkenbreite VB unter Einsatz variabler Kühlstrategien bei konstantem Eingriffsweg L_f für 100Cr640
<u>Bild 3-38:</u>	Zerspankraftkomponenten F_x unter Einsatz variabler Kühlstrategien für 100Cr641
<u>Bild 3-39:</u>	Maximale Kolktiefe KT_{max} unter Einsatz variabler Kühlstrategien für 100Cr641
<u>Bild 3-40:</u>	Verschleißmarkenbreite VB unter Einsatz variabler Kühlstrategien bei konstantem Eingriffsweg L_f für Cf53, 64 HRC42
<u>Bild 3-41:</u>	Zerspankraftkomponenten F_x unter Einsatz variabler Kühlstrategien für Cf53, 64 HRC42
<u>Bild 3-42:</u>	Maximale Kolktiefe KT_{max} unter Einsatz variabler Kühlstrategien für Cf53, 64 HRC43
<u>Bild 3-43:</u>	Spezifische CO_2 -Emission e_{CO_2} eines HW-K40- Werkzeugs nach der spanenden Bearbeitung von 100Cr646

0.3 Tabellenverzeichnis

<u>Tabelle 3-1:</u>	Metallurgische Zusammensetzung der zu untersuchenden Werkstoffe	5
<u>Tabelle 3-2:</u>	Initiales Prozessparameterfeld für die Zerspanuntersuchungen	6
<u>Tabelle 3-3:</u>	Anforderungsliste an die Teilkomponenten des innengekühlten Werkzeugsystems	8
<u>Tabelle 3-4:</u>	Binäre Dominanzmatrix zur Bewertung der Vorentwürfe	15
<u>Tabelle 3-5:</u>	Potenzielle Kühlfluide für den Einsatz im innengekühlten Werkzeugsystem ..	16
<u>Tabelle 3-6:</u>	Parametersätze für die nichtlinearen Belastungssimulationen in Abhängigkeit des Werkstoffs	18
<u>Tabelle 3-7:</u>	Übersicht der charakterisierten Werkzeugmikrogeometrie.....	22
<u>Tabelle 3-8:</u>	Parameterfeld der zu untersuchenden Einflussgrößen	27
<u>Tabelle 3-9:</u>	Gesamtleistung P_{ges} der Innenkühlung in Abhängigkeit der relevanten Einfluss- und Zielgrößen	29
<u>Tabelle 3-10:</u>	Exemplarische Fehler des innengekühlten Werkzeugsystems basierend auf Produkt- und Prozess-FMEA	44
<u>Tabelle 3-11:</u>	Gegenüberstellung der CO ₂ -Emission verschiedener Kühlstrategien	45
<u>Tabelle 3-12:</u>	Resultierende Werkzeugkosten in Abhängigkeit der Kühlstrategie.....	46

1 Zusammenfassung

Im Forschungsvorhaben wurde erstmals ein vollständiges geschlossen-innengekühltes Werkzeugsystem mit Wendeschneidplatten (WSP) für die Trockenbearbeitung in eine industrierelevante Werkzeugmaschine integriert. Zur Erreichung dieses Ziels wurden sowohl durch den Antragssteller IWF als auch durch die Kooperationspartner TESCH und EMAG fünf Arbeitspakete (AP) bearbeitet, welche in Bild 1-1 ersichtlich sind.

Konsortium

■ IWF ■ TESCH ■ EMAG

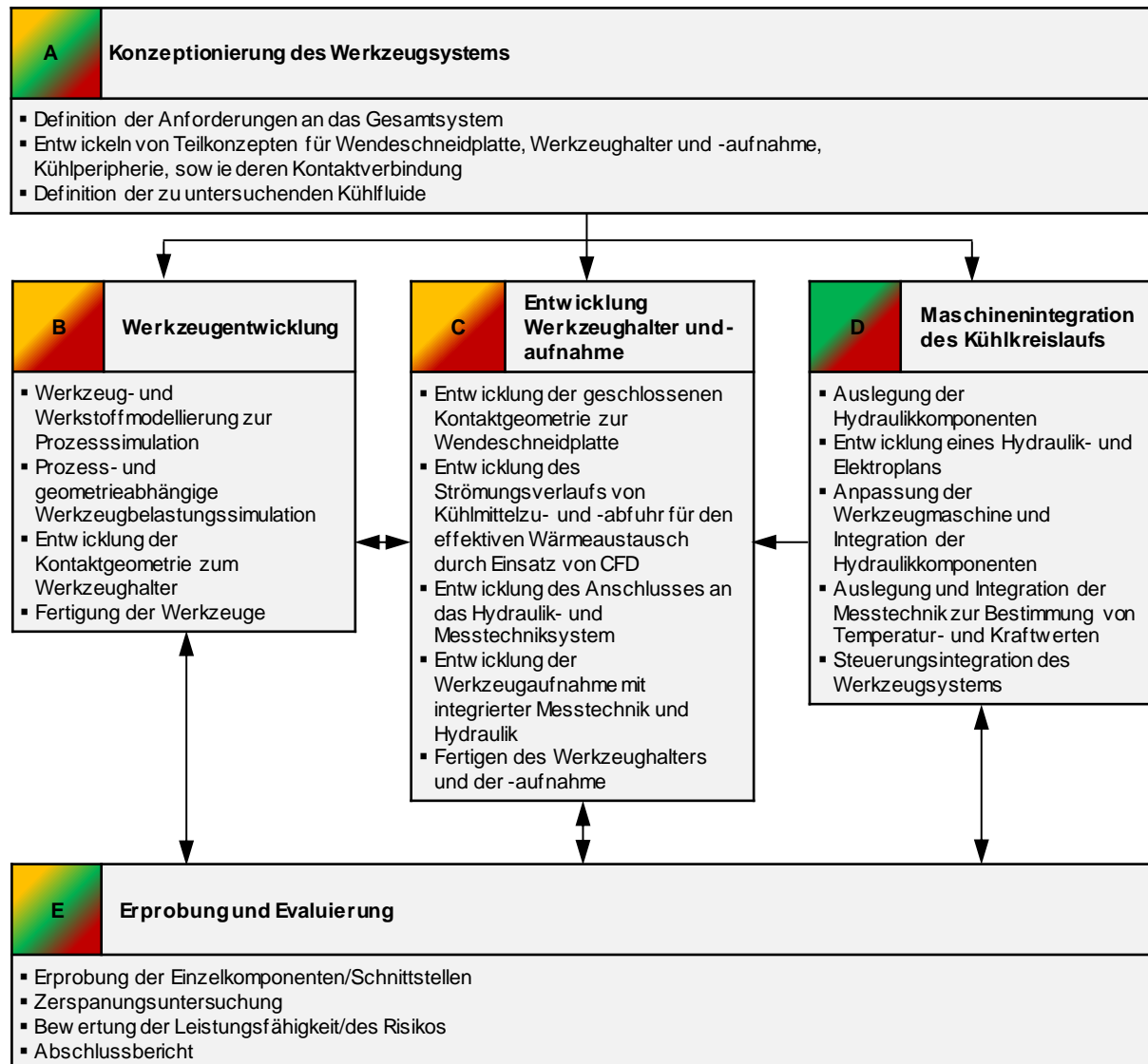


Bild 1-1: Ablaufplan der Arbeitspakete im Forschungsvorhaben

Dabei wurde in AP A das Gesamtsystem sowie die darin eingeschlossene Werkzeugperipherie, bestehend aus WSP, Werkzeughalter und -aufnahme sowie der Kühlperipherie und -medien konzipiert. Die Werkzeugentwicklung und -fertigung erfolgte in AP B. Hierbei wurden zur Beurteilung des thermo-mechanischen Lastkollektivs im Zerspanprozess initial prozess- und geometrieabhängige Belastungssimulationen durchgeführt. Parallel wurden in AP C Werkzeughalter und -aufnahme für die Innenkühlung, die Messtechnik sowie die Hydraulik an die

entsprechende Werkzeugmaschine angepasst. Ferner erfolgte auf Basis von Strömungssimulationen die Umsetzung der notwendigen Kontaktgeometrie zur Kühlung der WSP. Die Entwicklung und Fertigung des maschinenintegrierten Kühlkreislaufs wurden in AP D durchgeführt. Im Ergebnis konnte die Anpassung eines bestehenden Maschinensystems realisiert werden. Die abschließend in AP E durchgeführten Zerspanuntersuchungen ermöglichten die Beurteilung der Leistungsfähigkeit des innengekühlten Werkzeugsystems.

Der Abschlussbericht stellt die Tätigkeiten des gesamten Forschungsvorhabens über den offiziellen Förderzeitraums vom 01. Juli 2019 bis zum 30. Juni 2021 dar. Die inhaltliche Beschreibung der einzelnen AP ist getrennt voneinander aufbereitet und in Abschnitt 3 detailliert dargestellt.

2 Einleitung

Auf Grund der stetig wachsenden Rohstoffknappheit liegt der aktuelle Fokus moderner Produktionsprozesse auf der Energie- und Ressourceneffizienz [ROL12, LUT16]. Im Zusammenhang mit einer ökologischen und ökonomischen Denkweise sowie zunehmenden gesetzlichen Beschränkungen für den Einsatz von Kühlschmierstoffen (KSS), führt der aktuelle Trend zu dessen Reduzierung im Produktionsumfeld [BRI08, ÖST17]. So betragen die Kosten bedingt durch KSS während der Herstellung eines Produkts zwischen 8 bis 16 % der Gesamtfertigungskosten [DEU10, VSI18]. Diese Aufwendungen lassen sich jedoch durch den Verzicht konventioneller Überflutungskühlung respektive durch den Einsatz der Trockenbearbeitung erheblich senken [VSI18]. Somit kann ein direkter Beitrag zur Reduzierung von Gesundheits- und Umweltbelastungen geleistet werden. Im Speziellen kann die Gefahr möglicher Hautreaktionen oder Atemwegserkrankungen von Maschinenbedienern verhindert und die kostenintensive, umweltschädliche Entsorgung des KSS vermieden werden [KUC13].

Jedoch ist die Trockenbearbeitung gegenüber der konventionellen KSS-Bearbeitung bisher mit höheren Werkzeugtemperaturen verbunden, welche den Werkzeugverschleiß beschleunigen und das Werkstück schädigen. Daher bedarf es an effizienten Möglichkeiten, die Werkzeugtemperaturen zu senken. In diesem Forschungsvorhaben wurde hierfür ein neuartiges Werkzeugsystem mit geschlossener Innenkühlung entwickelt, welches auf KSS verzichtet. Die industrielle Akzeptanz eines geschlossen-innengekühlten Werkzeugsystems war bisher durch kostenintensiven Maschinenumrüstungen nicht gegeben. Darüber hinaus konnten auf Grund aufwändiger Werkzeugmodifikationen keine Standardwerkzeuge eingesetzt werden. Ziel der Entwicklung war es daher, die genannten Markteintrittsbarrieren für ein solches Werkzeugsystem zu eliminieren und somit der Industrie zugänglich zu machen.

3 Hauptteil

3.1 Arbeitspaket A - Konzeptionierung des Werkzeugsystems

3.1.1 A1 - Definition der Anforderungen an das Gesamtsystem

Die Definition der Anforderungen an das Gesamtsystem erfolgte durch das Konsortium bestehend aus EMAG, IWF und TESCH. Dabei wurden die maschinen- sowie prozesseitigen Randbedingungen mit dem Fokus auf eine industrielle Relevanz festgelegt. Maschinenseitig stellt sich das Konzept des innengekühlten Werkzeugsystems für die Trockenbearbeitung entsprechend Bild 3-1 dar.

Werkzeugmaschine

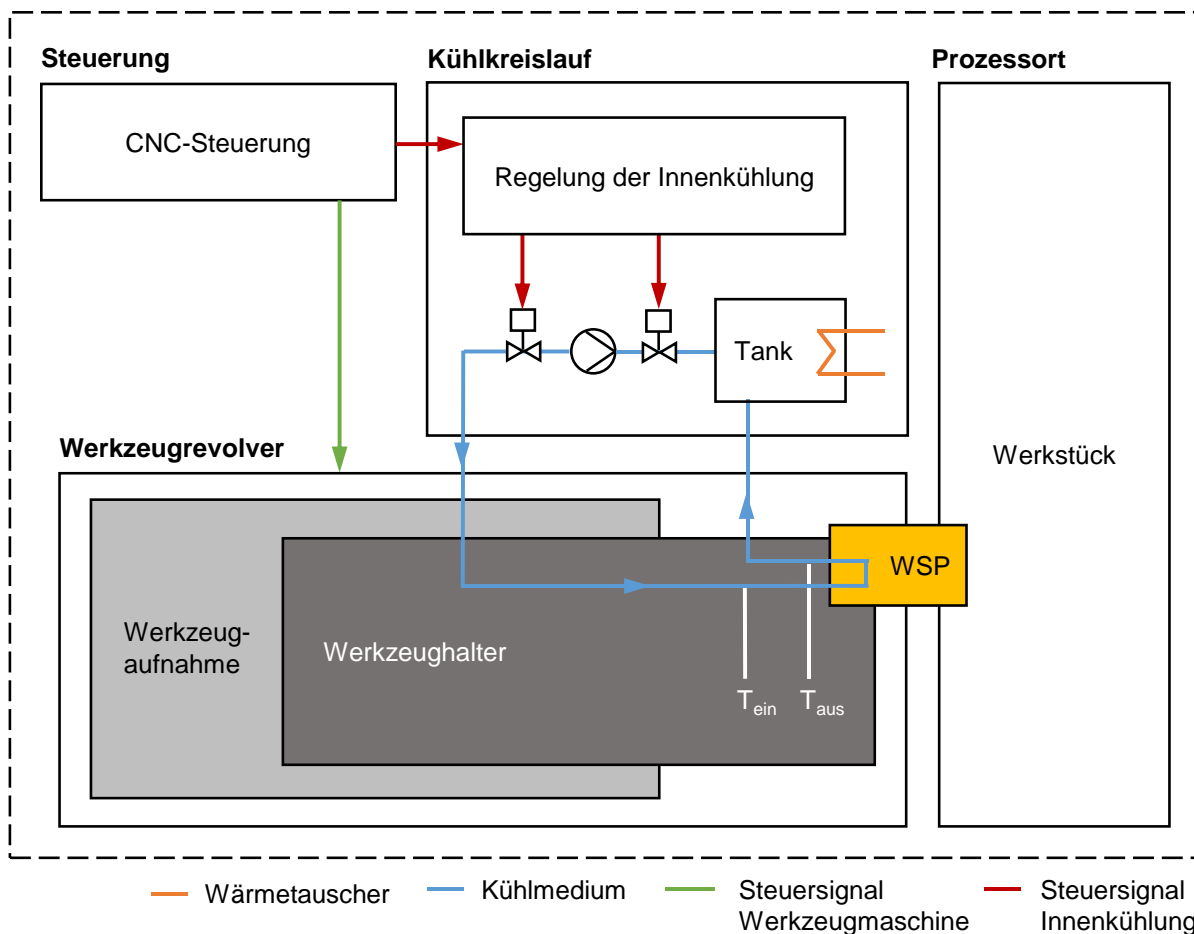
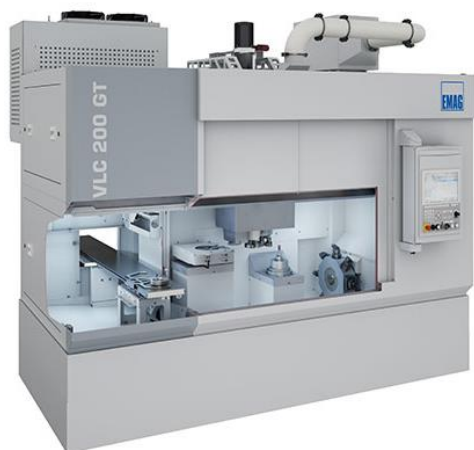


Bild 3-1: Schematische Darstellung des innengekühlten Werkzeugsystems

Die Aktivierung der Innenkühlung erfolgt über die CNC-Steuerung der Werkzeugmaschine mit Hilfe von Eingabeparametern, wie G-Code oder M-Funktionen. Dabei wird ein Kühlfluid durch eine geregelte Pumpe zwischen dem Tank sowie der WSP transportiert. Die im Prozess entstehende Wärme wird mit Hilfe eines Wärmetauschers dem Kühlkreislauf entzogen. Die Realisierung des innengekühlten Werkzeugsystems erfolgt an einer Vertikaldrehmaschine VLC 200 GT, Fa. EMAG MASCHINENFABRIK GMBH, Salach, Bild 3-2.



Vertikaldrehmaschine VLC 200 GT

EMAG MASCHINENFABRIK GMBH

Baujahr 2019

Eigenschaften:

Antriebsleistung: $P_{A,ED40} = 22 \text{ kW}$
 $P_{A,ED100} = 18 \text{ kW}$
 Ladezeit $t_L = 6 \dots 10 \text{ s}$

Hauptspindel:

Max. Drehzahl: $n_{max} = 3.000 \text{ min}^{-1}$
 Futterdurchmesser: $d_F = 210 \text{ mm}$

Verfahrwege:

Höhe: X = 1.700 mm
 Länge: Z = 250 mm

Bild 3-2: Vertikaldrehmaschine VLC 200 GT
 der Fa. EMAG MASCHINENFABRIK GMBH, Salach

Die Werkzeugmaschine verfügt im Gegensatz zu konventionellen Drehmaschinen über einen Blockstahlhalter als Werkzeugaufnahme, welcher statisch in den Bearbeitungsraum eingebunden ist. Das Verfahren und Positionieren der zu bearbeitenden Bauteile übernimmt die Hauptspindel. Für die aus Werkzeugaufnahme und -halter bestehende Baugruppe wird das System Coromant Capto®, Fa. SANDVIK COROMANT AB, Sandviken, Schweden, eingesetzt. Dieses ermöglicht schnelle Rüstzeiten bei Positioniergenauigkeiten der Werkzeugschneide von weniger als 2 µm. Ein erneutes Einrichten von Werkzeugen kann somit entfallen. Weiterhin wurden auf Seiten des Zerspanprozesses Randbedingungen definiert. Auf Grund der industriellen Relevanz sollen vor allem die Weich- und die Hartbearbeitung von Stahl mit dem innengekühlten Werkzeugsystem untersucht werden. Für die Weichbearbeitung wird der Wälzlagerstahl 100Cr6 eingesetzt. Die Hartbearbeitung erfolgt auf Grundlage eines gehärteten Vergütungsstahls Cf53. In Tabelle 3-1 ist die metallurgische Zusammensetzung beider Werkstoffe dargestellt.

Tabelle 3-1: Metallurgische Zusammensetzung der zu untersuchenden Werkstoffe

Werkstoff		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al
100Cr6	min.	0,93	0,15	0,25	-	-	1,35	-	-
	max.	1,05	0,35	0,45	0,025	0,015	1,60	0,1	-
Cf53	min.	0,50	-	0,40	-	-	-	-	0,02
	max.	0,60	0,40	0,90	0,03	0,035	-	-	0,05

Die Leistungsfähigkeit des innengekühlten Werkzeugsystems wird durch einen kontinuierlichen Außen-Längs-Runddrehprozess bewertet. Dabei soll das Funktionsmuster die Werkzeuggeometrie CNMN12*08 nach DIN ISO 1832 [DIN1832] aufnehmen können. Für die Hartbearbeitung ist darüber hinaus eine Fase zur Schneidkantenstabilisierung der WSP vorgesehen. Der für die Zerspanung eingesetzte Schneidstoff ist Hartmetall auf Basis von Wolframcarbid (HW). Im Allgemeinen wird das unbeschichtete Schneidstoffsystem aus Wolframcarbid (WC) und Cobalt (Co) nicht für die Stahlbearbeitung eingesetzt. Ursächlich hierfür ist die Affinität beider Reibpartner zur Diffusion auf Grund höherer Temperaturen T, welche u. a. durch steigende Schnittgeschwindigkeiten v_c verursacht werden. Im Zerspanprozess stellt sich

dabei ein ausgeprägter Kolkverschleiß resultierend aus dem Konzentrationsgefälle von Kohlenstoff (C) im Werkzeug ein. Die Zugabe von Titancarbid (TiC) ermöglicht es jedoch, diesen Effekt zu kompensieren sowie die Warmhärte positiv zu beeinflussen [HEI14]. Durch das breite Anwendungsspektrum hinsichtlich bearbeitbarer Werkstoffe nimmt HW darüber hinaus eine dominante Rolle innerhalb der industriellen Zerspanung ein. Deutlich wird dies u. a. durch die steigende Produktion von HW, welche sich zwischen den Jahren 2000 und 2008 auf eine Gesamtmasse von $m_{HW} = 60.000$ t verdoppelt hat [GAR19]. Eine Erhöhung der Standzeit T_{VB} durch die erfolgreiche Umsetzung einer Innenkühlung kann somit in einem hohen Einsparpotenzial von WSP auf Basis von HW resultieren. Auf Grund der Skaleneffekte kann in Konsequenz ein reduzierter Abbau von Schwermetallen wie Wolfram welche derzeit Engpässe aufweisen und überwiegend in China abgebaut werden, stattfinden [HAN19]. Voraussetzung für die Einsparung ist hierbei die Nutzung identischer Prozessparameter. Weiterhin besteht in Verbindung mit der Innenkühlung das Potenzial kostenintensive Schneidstoffe durch Nutzung des innengekühlten Werkzeugsystems durch HW zu substituieren. Auf Grundlage dieses Schneidstoffs konnte im Konsortium das initiale Prozessparameterfeld für die Zerspanuntersuchungen definiert werden, Tabelle 3-2. Die Auswahl eines konkreten Parametersatzes erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt in Abhängigkeit der Ergebnisse aus den Belastungssimulationen im Rahmen des AP B.

Tabelle 3-2: Initiales Prozessparameterfeld für die Zerspanuntersuchungen

Parameter	Schnittgeschwindigkeit v_c	Schnitttiefe a_p	Vorschub f
Einheit	$m \text{ min}^{-1}$	mm	mm
100Cr6	180 ... 200	0,25 ... 2	0,1 ... 0,4
Cf53, 64 HRC	150 ... 180	0,15	0,1

Wie beschrieben, wurde der Fokus des Vorhabens auf die Bearbeitung von Stählen gerichtet. Grund hierfür ist, analog zur Nutzung von HW, der große Absatzmarkt der Werkstoffgruppe. So wird Stahl in vielen Wirtschaftszweigen, wie der Energietechnik, dem Bauwesen sowie dem Maschinen- und Anlagenbau eingesetzt. In Konsequenz betrug die globale Erzeugung von Rohstahl im Jahr 2017 ca. $m_{St} = 138.000.000$ t [DOE17, SIM17]. Während der spanenden Formgebung wird dabei überwiegend auf wassermischbare KSS auf Grundlage der konventionellen Überflutungskühlung zurückgegriffen [HER17]. Diese weist jedoch zahlreiche Nachteile im Hinblick auf ökologische und wirtschaftliche Aspekte auf.

Unter den Aspekten der Nachhaltigkeit und der Produktivität sowie möglicher Einsparpotenziale ist auf Basis der dargestellten Ausgangslage mit einem breiten Anwendungsspektrum, einer großen Kundenakzeptanz sowie geringen Markteintrittsbarrieren für das innengekühlte Werkzeugsystem zu rechnen.

3.1.2 A2 - Entwickeln von Teilkonzepten für die Wendeschneidplatte, Werkzeughalter und -aufnahme, Kühlperipherie sowie deren Kontaktverbindung

Der Entwicklungsprozess des innengekühlten Werkzeugsystems basiert auf der VDI 2221-1, welche eine iterative Vorgehensweise gewährleistet [VDI2221-1]. Die Richtlinie umfasst dabei vier Phasen für die erfolgreiche Produktentwicklung. In Bild 3-3 ist die Vorgehensweise sowie die daraus resultierenden Arbeitsergebnisse zur Entwicklung des innengekühlten Werkzeugsystems während des Forschungsvorhabens dargestellt. Durch die Definition der relevanten Anforderungen innerhalb der Planungsphase können Funktionsstruktur und Teillösungen für das Gesamtsystem abgeleitet werden, welche zur Erstellung unterschiedlicher Lösungsvarianten genutzt werden. Daran schließt sich die Konzeptionsphase an, welche nach Beendigung mehrere prinzipielle Lösungen für das Gesamtsystem bereitstellt. Es folgt eine Detaillierung zu Vorentwürfen, welche auf Teillösungen eines morphologischen Kastens basieren. Die Festlegung eines favorisierten Entwurfs wird auf Grundlage einer Bewertung nach technisch-wirtschaftlichen Aspekten realisiert. Im Ergebnis liegt ein detaillierter Gesamtentwurf vor. Der Entwicklungsprozess wird final durch eine Dokumentation abgeschlossen. In diesem Rahmen werden alle technischen Einzelteilzeichnungen für die Fertigung des innengekühlten Werkzeugsystems erstellt.

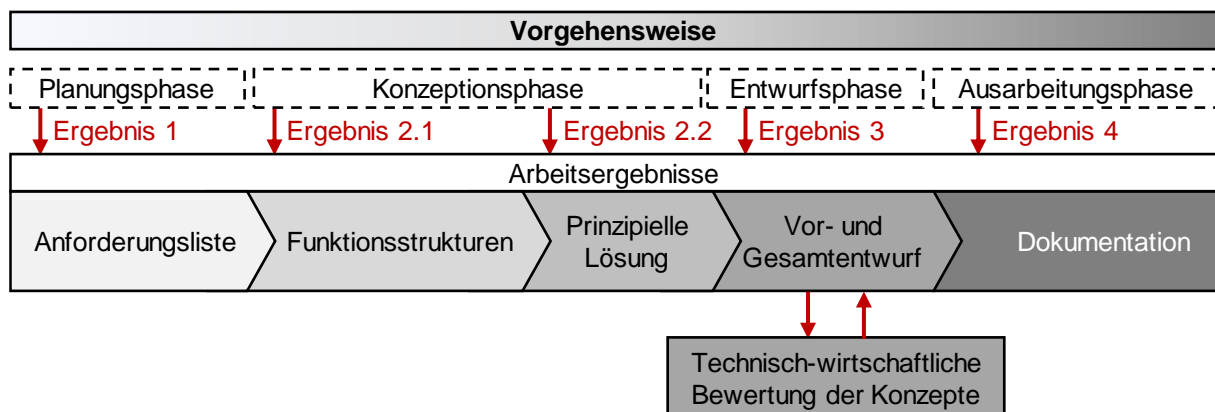


Bild 3-3: Schematische Darstellung der Vorgehensweise sowie der Arbeitsergebnisse nach VDI 2221-1

Die Festlegung der notwendigen Randbedingungen für die Systemkonzeption erfolgte unter Berücksichtigung der maschinen-, prozess-, system- und werkstoffbezogenen Definitionen aus AP A1. Neben einer Kategorisierung der relevanten Teilkomponenten bestehend aus WSP, Werkzeughalter, Werkzeugaufnahme und -revolver sowie Kühlperipherie werden die jeweiligen Anforderungen an das innengekühlte Werkzeugsystem durch Forderung (F), Empfehlung (E) und Wunsch (W) festgelegt. Die Gesamtheit der definierten Anforderungen an die jeweiligen Teilkomponenten stellt Ergebnis 1 dar und ist in Tabelle 3-3 zusammengefasst. Das übergeordnete Ziel des innengekühlten Werkzeugsystems ist die Gewährleistung einer hohen Effizienz des Kühlsystems. Sie stellt das Verhältnis aus entzogener Prozesswärme und aufzubringender Energie im Hinblick auf die geschlossene Innenkühlung dar. Eine Quantifizierung dieser Anforderung erfolgt innerhalb der Entwurfsphase durch eine detaillierte Auslegung.

Tabelle 3-3: Anforderungsliste an die Teilkomponenten des innengekühlten Werkzeugsystems

Lfd. Nr.	Beschreibung	Kategorie
Allgemeine Vorgaben		
0	Hohe Effizienz des Kühlsystems	F
1	Niedrige Fertigungskosten	W
2	Kompatibilität zu unterschiedlichen Werkzeugmaschinen	W
3	Kurze Rüstzeiten / Einfacher Wechsel von Verschleißteilen	E
4	Keine negative Beeinträchtigung bestehender Systeme	F
WSP		
5	Werkzeugspezifikation ohne Modifikation nach DIN ISO 1832	F
6	Form C, Größe 12, Eckenradius 08	F
7	Dickenspezifikation 01, 02 und 04	F
8	Orthogonalfreiwinkel $\alpha_0 = 0^\circ$	F
Werkzeughalter		
9	Schnittstelle zur WSP nach DIN ISO 10889-1	F
10	Schnittstelle zur Werkzeugaufnahme basierend auf Capto®-System	F
11	Capto®-Polygon C5	F
12	Wirkspanwinkel $\gamma_x = -6^\circ$	
13	Hohe Steifigkeit / Sichere Aufnahme der Prozesskräfte	W
14	Wiederholgenaue WSP-Positionierung	F
15	Integrierte Kühlleitungen	W
16	Einfacher Werkzeugwechsel	W
Werkzeugaufnahme und -revolver		
17	Einsatz eines Blockstahlhalters	F
18	Werkzeugaufnahme basierend auf Capto®-System	F
19	Capto®-Aufnahme C5	F
20	Integrierte Kühlleitungen	W
21	Mechanische Klemmung des Werkzeughalters	W
Kühlperipherie		
22	Geschlossener Kreislauf des Kühlfluids	F
23	Effizienter Wärmetransport	F
24	Geringe Strömungsverluste in Zu- und Ablauf der Kühlleitungen	E
25	Sensorik zur Temperaturerfassung in Prozessnähe	W
26	Technische Dichtheit	F

Für den Entwicklungsprozess ist es notwendig, die jeweilige Funktion des Gesamtsystems sowie dessen assoziierte Teilprobleme zu identifizieren. Zu diesem Zweck wird innerhalb der Konzeptionsphase die Funktionsstruktur abgeleitet. Somit wird es ermöglicht, potenzielle Teilprobleme des innengekühlten Werkzeugsystems zu identifizieren. Für ein konventionelles Werkzeugsystem wurden vier Hauptfunktionen basierend auf den mechanischen Teilkomponenten WSP, Werkzeughalter sowie Werkzeugaufnahme und Blockstahlhalter identifiziert. Aus den jeweiligen Funktionen leiten sich Teilprobleme ab, welche für das Gesamtsystem im Entwicklungsprozess gelöst werden müssen, Bild 3-4.

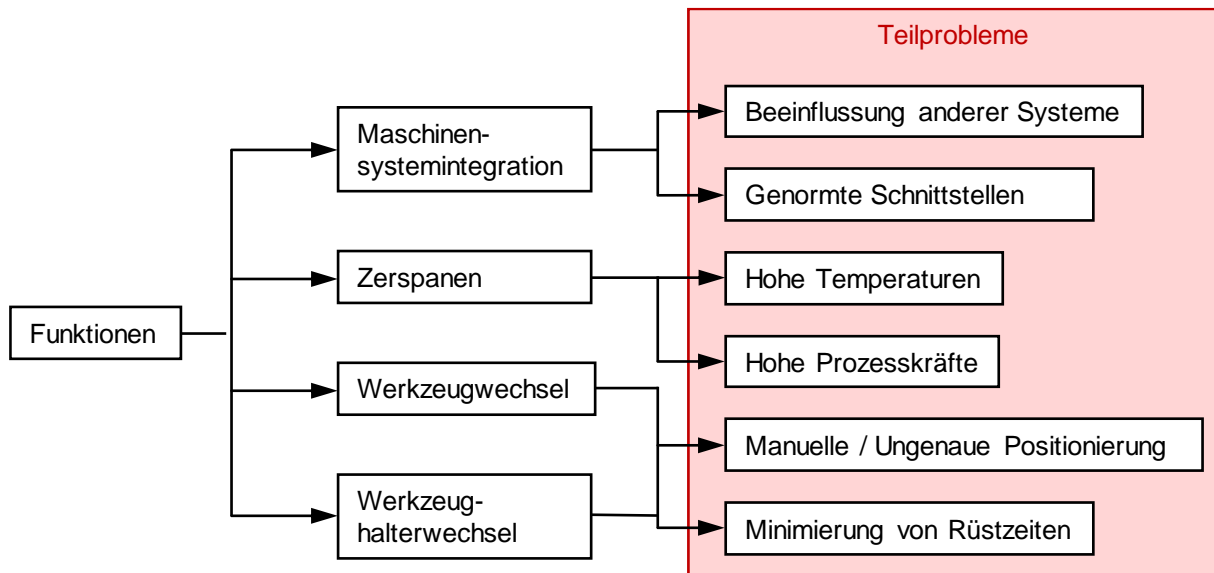


Bild 3-4: Funktionsstruktur eines konventionellen Werkzeugsystems sowie resultierende Teilprobleme

Es ist ersichtlich, dass die Teilprobleme „Hohe Temperaturen“ und „Hohe Prozesskräfte“ die zu lösende Funktion „Zerspanen“ definieren. Die Analyse der hierbei resultierenden Material- und Energieflüsse erfolgte nach VDI 2221-1 in Form einer dort definierten Blackbox, Bild 3-5.

Beide Teilprobleme treten lokal im Eingriffsbereich der WSP-Schneide auf. Dabei wird die Prozesskraft auf die WSP durch mechanische Verformung respektive auf Grund der Spanbildung des Werkstücks verursacht. Die thermische Belastung ist eine Folge der Reibung innerhalb der sekundären Scherzone. Sowohl die Funktionsstruktur als auch die Blackbox stellen in Anlehnung an Bild 3-3 das Ergebnis 2.1 dar, welches die Grundlage zur Identifikation der prinzipiellen Lösungen bildet.

Die Entwicklung von prinzipiellen Lösungen ermöglicht es, unterschiedliche Funktionsweisen des Gesamtsystems für das Teilproblem „Hohe Temperaturen“ zu identifizieren. Hierbei erfolgt zusätzlich die Ermittlung inhärenter Vor- und Nachteile der jeweiligen Lösung für den sich anschließenden Bewertungsprozess. Gegenstand der Betrachtung sind neben den mechanischen Teilkomponenten WSP inklusive Kühlkörper, Werkzeughalter, Werkzeugaufnahme und Blockstahlhalter auch die Kühlfluidführung. Die resultierenden Lösungen stellen Ergebnis 2.2 dar.

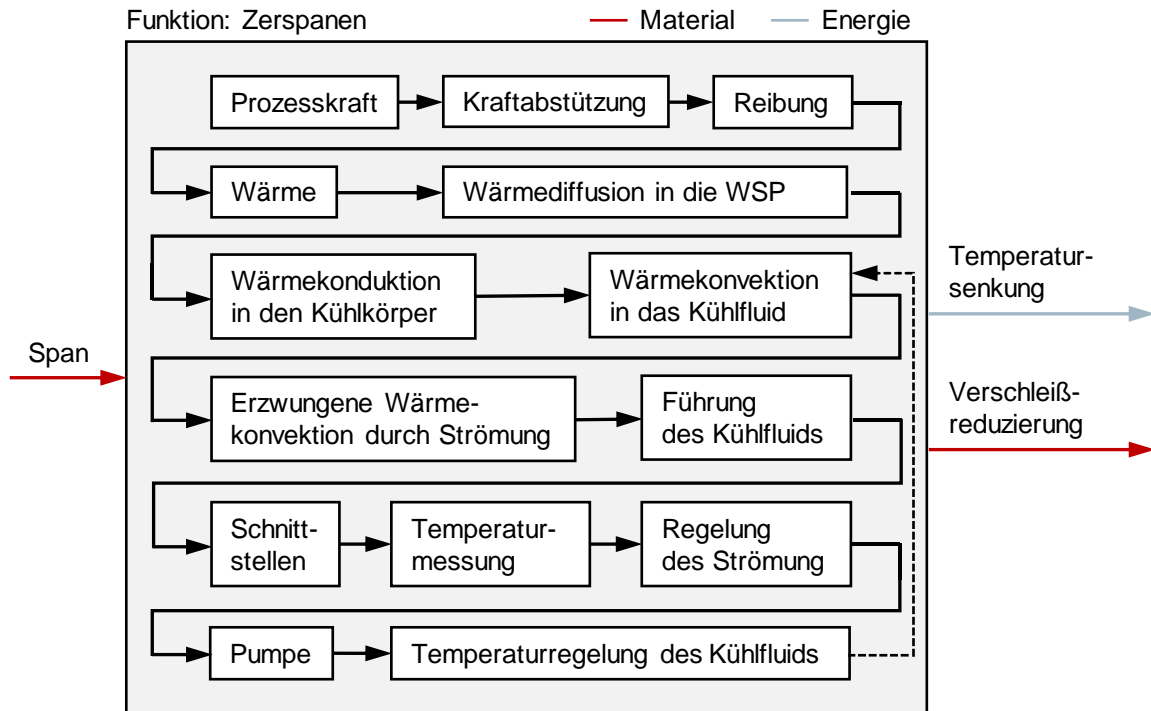


Bild 3-5: Material- und Energiefluss der Funktion "Zerspanen" auf Basis einer Blackbox

Die in Bild 3-6 dargestellte Lösung sieht eine vollständige Integration der Kühlleitungen innerhalb der mechanischen Teilkomponenten vor. Die Positionierung des Kühlkörpers erfolgt unterhalb der WSP. Es ist anzumerken, dass auf Grund der Prozesskräfte und der daraus resultierenden Steifigkeitsanforderungen eine geringe Nachgiebigkeit des Werkzeughalters unterhalb der WSP notwendig ist. Der Wärmetransport verläuft senkrecht von der Spanfläche zur Werkzeugunterseite. Es ist davon auszugehen, dass die Effizienz der Kühlung hierbei von der Dicke s der WSP abhängig ist. Ein Vorteil der vollständigen Kühlleitungsintegration ist ein schnellerer Werkzeugalterwechsel sowie die Vermeidung von Leckagen während der Zerspanung, welche durch den prozessbedingten Späneflug in Kombination mit externen Leitungen zunehmend auftreten können. Jedoch bedarf dieser Ansatz einer höheren Modifikation bestehender Werkzeugsysteme zur Gewährleistung von technisch-dichten Schnittstellen zwischen allen mechanischen Komponenten.

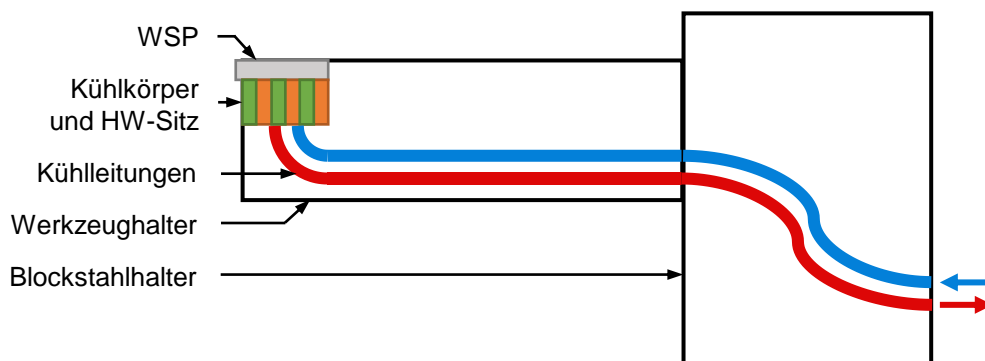


Bild 3-6: Skizze der ersten Lösung für das Teilproblem „Hohe Temperaturen“

Innerhalb der zweiten Lösung liegt der Kühlkörper ebenfalls unterhalb der WSP, Bild 3-7. Hierbei erfolgt die Führung des Kühlfluids jedoch durch externe Leitungen. Diese Ausführung hat den Vorteil, dass im Vergleich zur ersten Lösung externe Sensortechnik in Kühlkörpernähe

vorgesehen werden kann. Darüber hinaus ist die Entwicklung sowie die Fertigung auf Grund einer geringeren Komponentenintegration einfacher und kostengünstiger.

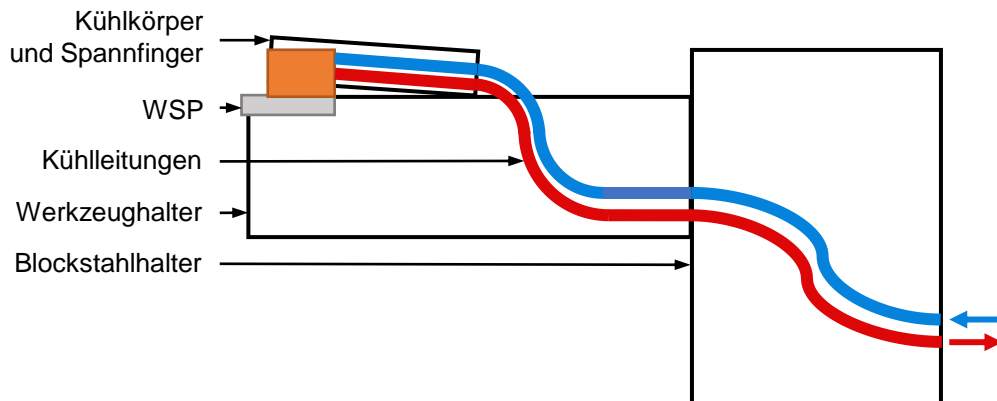


Bild 3-7: Skizze der zweiten Lösung für das Teilproblem „Hohe Temperaturen“

Neben einer Veränderung der Führung von Kühlleitungen ist ferner die Variation des Kühlkörpers möglich, **Bild 3-8**. Zur mechanischen Fixierung der WSP ist der Einsatz eines Spannringes realisierbar. Hierbei erfolgt die Integration der Kühlleitungen im Spannring. Jedoch erfordert dessen Flexibilität eine externe Kühlleitung zwischen Spannring und Blockstahlhalter. Gegenüber den ersten beiden Lösungen besteht der Vorteil einer Positionierung des Kühlelements auf der Spanfläche. Folglich bietet sich das Potenzial eines verbesserten Wärmetransports auf Grund einer näheren Positionierung am Prozessort. Darüber hinaus fällt die resultierende Belastung auf das Kühlelement gegenüber einer Positionierung unterhalb der WSP durch die fehlende Prozesskraft geringer aus.

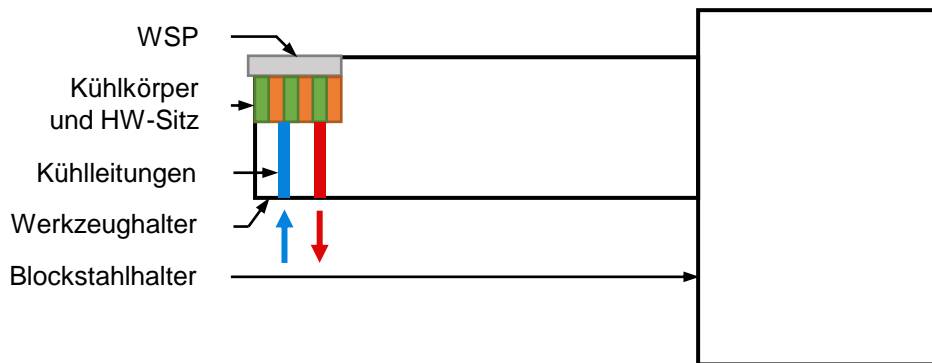


Bild 3-8: Skizze der dritten Lösung für das Teilproblem „Hohe Temperaturen“

Nach Definition der Lösungen erfolgte die Gliederung des Gesamtsystems in Module respektive modulare Strukturen. Diese stellen realisierbare Teilsysteme dar, welche eine effiziente Aufteilung der Entwicklungsschwerpunkte ermöglichen. Ziel ist die Lösung der identifizierten Teilprobleme, wie z. B. „Hohe Temperaturen“. Zu diesem Zweck wird die Methode des morphologischen Kastens eingesetzt, **Bild 3-9**. Hierbei erfolgte die Entwicklung mehrerer Lösungsvarianten für die jeweilige modulare Struktur. Dabei ist von entscheidender Bedeutung, dass nicht alle Lösungsvarianten der unterschiedlichen modularen Strukturen miteinander kompatibel sind. Sie zeigen jedoch einen hinreichenden Abstraktionsgrad auf, um selektive Verknüpfungen herstellen zu können.

Die modulare Struktur „Kühlkörper und Werkzeugaufgabe“ stellt den Schwerpunkt der Entwicklungsaufgabe dar. Hierbei werden die identifizierten Teilprobleme der Kraft- und Wärmeleitung

betrachtet. Diese kombinierte Betrachtung ist auf Grund der Abstimmung von Kühlkörper- und Werkzeugauflagegeometrie notwendig. Eine Kombination unterschiedlicher Geometrien ist in diesem Zusammenhang nicht zielführend. Diese modulare Struktur bedarf in der sich anschließenden Entwurfsphase einer detaillierten Auslegung im Hinblick auf die thermo-mechanischen Randbedingungen. Weitere modulare Strukturen beschreiben die Führung des Kühlfluids durch das Gesamtsystem sowie die Realisierung einer technischen Dichtheit innerhalb der jeweiligen mechanischen Schnittstellen. Darüber hinaus bestehen Lösungen für die kraft- und formschlüssige Fixierung der WSP sowie dessen realisierbare Dicken s in Abhängigkeit der festgelegten Lösung.

■ Vorentwurf 1 □ Vorentwurf 2 ■ Vorentwurf 3

Modulare Strukturen	Lösungsvariante			
	A	B	C	D
Werkzeughalter				
Kühlkörper und Werkzeugauflage	Additive Fertigung; Kühlkörper nahe WSP-Schneide ■	Additive Fertigung; HW-Sitz nahe WSP-Schneide □	Konventionelle Fertigung; HW-Sitz mit Kupferplatte □	Konventionelle Fertigung; Kühlkörper im Spannfinger ■
Schnittstelle von Kühlkörper zu Kühlmittleitung	Lötverbindung □	Klebverbindung ■	Papierdichtung ■	-
Kühlleitung	Bohrungen bis zur Capto®-Schnittstelle ■	Bohrungen zu Schlauch-schnittstelle □	Bohrungen durch Spannfinger ■	-
Schnittstelle von Kühlleitung zur Kühlperipherie	Radiale Bohrungen in der Capto®-Polygonwelle ■	Axiale Bohrungen in der Capto®-Polygonwelle □	Externe Führung durch Steckverbinder am Werkzeughalter □	Externe Führung durch Schlauchtüllen am Spannfinger ■
Positionierung und Fixierung der WSP	Spannfinger ■ □ ■	Schraube durch WSP □	-	-
Werkzeug				
WSP-Dicke s	1,58 mm ■ □	2,38 mm □	3,18 mm □	4,76 mm ■
Blockstahlhalter				
Kühlleitung	Führung von Schläuchen □ ■	Anschluss von Schläuchen □	Interner Anschluss an Capto®-Schnittstelle ■	-

Bild 3-9: Morphologischer Kasten zur Bildung von Vorentwürfen

Auf Basis der modularen Strukturen sowie der ausgewählten Lösungsvarianten wurden drei Vorentwürfe abgeleitet. Dabei korrelieren die Vorentwürfe mit den jeweilig dargestellten Lösungen. Im ersten Vorentwurf befindet sich der Kühlkörper unter der WSP. Die Führung des Kühlfluids erfolgt intern durch alle mechanischen Teilkomponenten bis zum Blockstahlhalter, Bild 3-10a. Zur Realisierung eines effizienten Wärmetransports von Spanfläche zur Werkzeugunterseite ist hierbei eine WSP mit der Dickenspezifikation 01 respektive $s = 1,58 \text{ mm}$ gewählt worden. Als Schnittstelle zwischen WSP und Kühlfluid dient ein Kupferblech, welches dichtend mit dem Kühlkörper verlötet wird. Die Zu- und Abfuhr des Kühlfluids erfolgt axial durch den Werkzeughalter und wird über die Capto®-Schnittstelle dem Blockstahlhalter zugeführt. Eine technische Dichtheit ist hierbei durch die hohe Oberflächengüte und geringe Fertigungstoleranz von Polygonwelle und -nabe gegeben, Bild 3-10b. Die Fixierung und Positionierung der WSP erfolgt mit Hilfe eines Spannfingers.

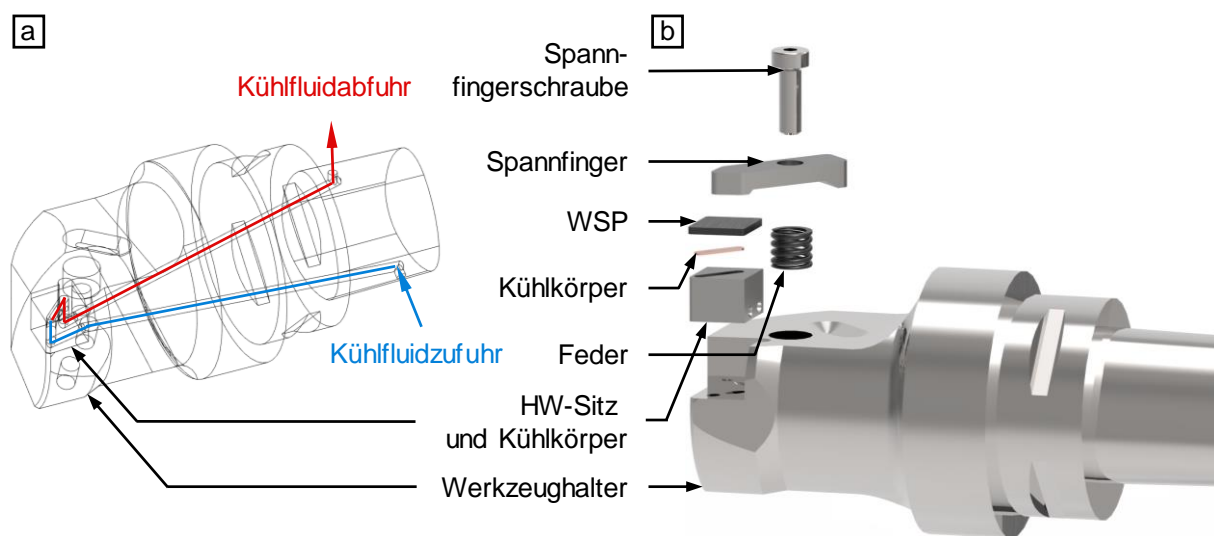


Bild 3-10: Erster Vorentwurf; a) Schnittansicht; b) Explosionsansicht

Der zweite Vorentwurf sieht eine externe Zu- und Abfuhr des Kühlfluids über flexible Schläuche vor. Analog zum ersten Vorentwurf ist der Kühlkörper unter der WSP positioniert. Hierbei wurde als einzusetzender Werkstoff Kupfer definiert. Die Fertigung des Kühlkörpers erfolgt auf Grund einer komplexen Führung des Kühlfluids durch pulverbettbasiertes Schmelzen mittels Laserstrahl. Der Kühlkanal verläuft stetig, um Strömungsverluste zu minimieren, Bild 3-11a. Der resultierende Wärmefluss verläuft orthogonal von der Spanfläche zur Werkzeugunterseite. Zur Erhöhung der Kühleffizienz wird eine WSP der Dickenspezifikation 01 respektive $s = 1,58 \text{ mm}$ vorgesehen. Für die Realisierung eines definierten Kontakts zwischen Kühlkörper und WSP ist ein Aufmaß des Kühlkörpers vorgesehen. Somit wird eine elastisch-plastische Verformung während der Montage sowie ein verbesserter Wärmetransport während des Drehprozesses sichergestellt. Ein Sitz aus HW verhindert weiterhin unzulässige Verformungen des Kühlkörpers und positioniert zeitgleich die WSP, Bild 3-11b. Die Erzeugung einer technischen Dichtheit zwischen Kühlkörper und Werkzeughalter erfolgt durch eine Klebverbindung. Zusätzlich führen zwei Bohrungen im Werkzeughalter zu lösbaren Steckverbindungen, welche die Schnittstelle für Zu- und Abfuhr des Kühlfluids realisieren. Die Fixierung der WSP erfolgt, analog zum ersten Vorentwurf, durch einen Spannfinger.

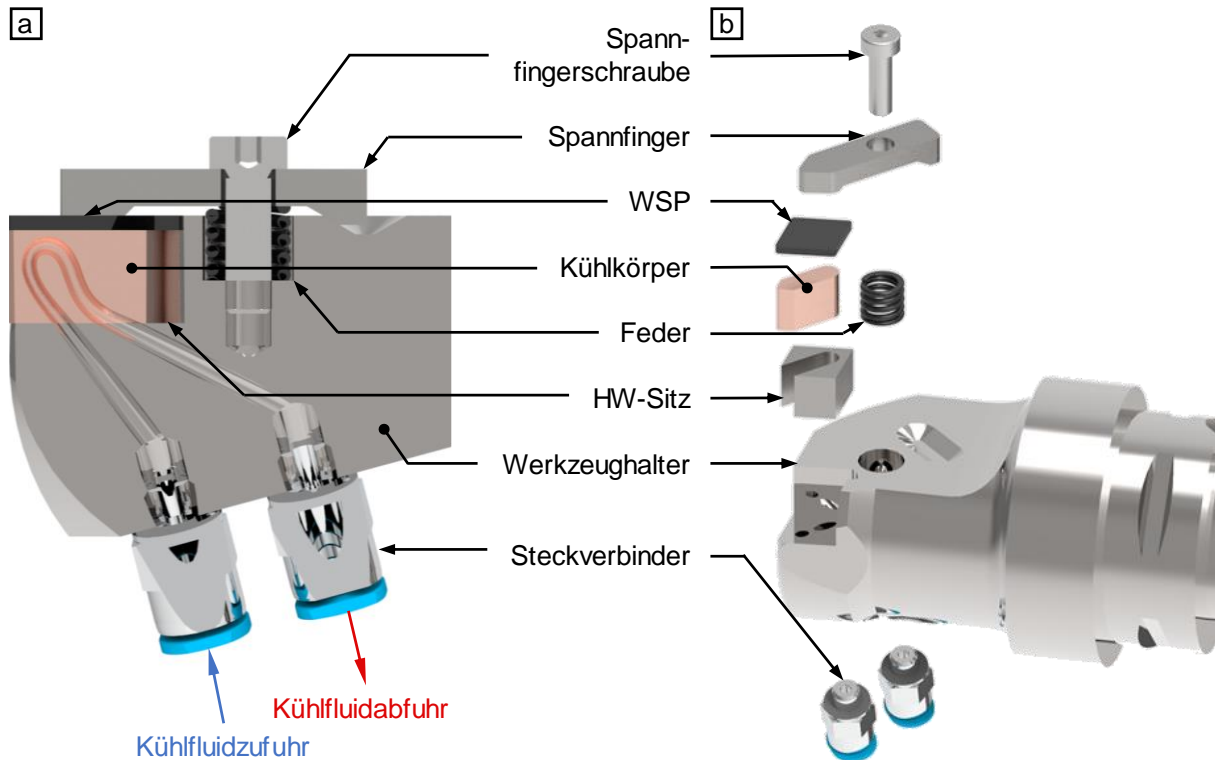


Bild 3-11: Zweiter Vorentwurf; a) Schnittansicht; b) Explosionsansicht

In Bild 3-12a ist der dritte Vorentwurf dargestellt, welcher die Funktion von Fixierung und Kühlung im Spannfinger kombiniert. Zu diesem Zweck ist der Spannfinger zweiteilig ausgeführt. Auf der Stirnseite sitzt ein Kühlkörper aus Kupfer, welcher einen direkten Kontakt mit der WSP aufweist. Basierend auf der geometrischen Form des Kühlkörpers wird eine hohe Kontaktfläche für den Wärmetransport realisiert, Bild 3-12b. Der Kraftschluss erfolgt auf Basis einer Schraubverbindung mit dem Werkzeughalter. Für die Dichtung beider Spannfingerkomponenten wird eine Papierdichtung eingesetzt. Die Zu- und Abfuhr des Kühlfluids erfolgt innerhalb des Spannfingers und wird im Anschluss durch Schlauchtüllen extern zum Blockstahlhalter geführt. Auf Basis des dritten Vorentwurfs ist die Wahl der WSP-Dicke s flexibel. Hierbei besteht jedoch die Notwendigkeit unterschiedlicher Sitze aus HW zur Höhenkompensation.

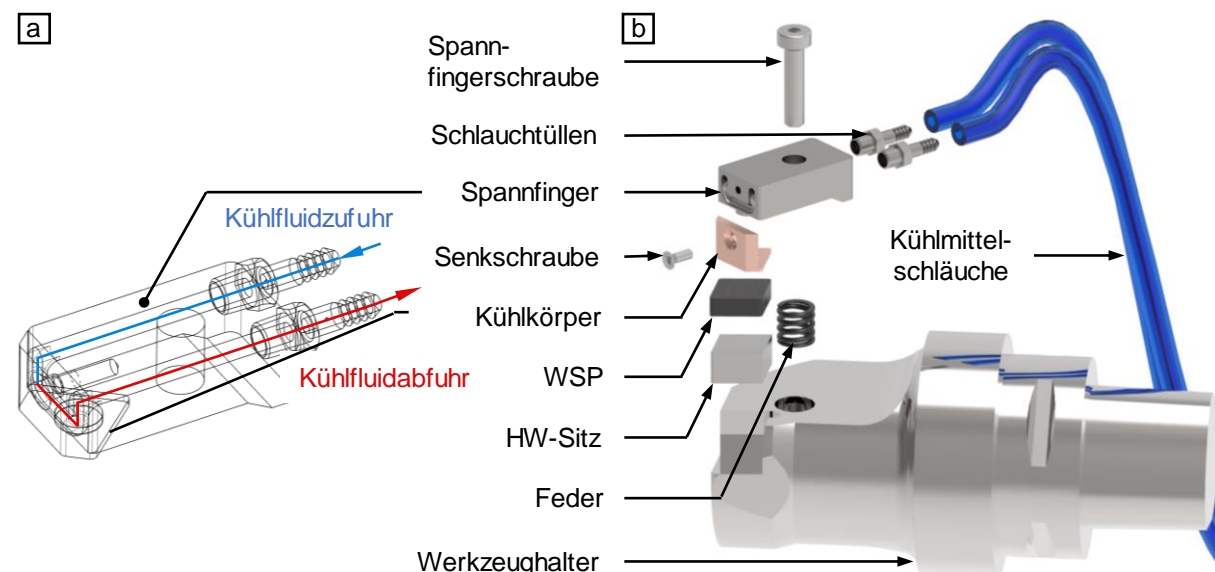


Bild 3-12: Dritter Vorentwurf; a) Schnittansicht; b) Explosionsansicht

Die Festlegung eines favorisierten Vorentwurfs erfolgte unter Berücksichtigung technisch-wirtschaftlicher Aspekte mit Hilfe einer binären Dominanzmatrix, Tabelle 3-4. Die hierfür untersuchten Bewertungskriterien sind Kühleffizienz, Ergonomie und Fertigungskomplexität.

Tabelle 3-4: Binäre Dominanzmatrix zur Bewertung der Vorentwürfe

Bewertungskriterien	Vorentwurf		
	1	2	3
Kühleffizienz			
Wärmetransport	1	0	1
Abmessung der Kontaktfläche	1	1	0
Länge der Zu- und Abführung	1	0	0
Strömungsgerechte Geometrie	0	1	0
Oberflächengüte der Zu- und Abführung	1	0	1
Ergonomie			
Zeit für Werkzeugwechsel	0	0	1
Wiederholgenauigkeit der Werkzeugposition	1	1	0
Zeit für Werkzeughalterwechsel	1	0	0
Flexibilität der WSP-Dicken s	0	0	1
Werkzeugmaschinenkompatibilität	1	0	0
Fertigungskomplexität			
Kosten	0	0	1
Serienproduktion	1	0	1
Summe Σ	8	3	6

Es ist ersichtlich, dass der erste Vorentwurf als Gesamtlösung favorisiert wird und daher Ergebnis 3 darstellt. Ausschlaggebend für das Resultat der binären Dominanzmatrix sind insbesondere die Abmessungen der Kontaktfläche, welche gegenüber dem zweiten und dritten Vorentwurf größer ausgeführt werden kann. In Konsequenz ist eine positive Beeinflussung des Wärmetransports zu erwarten. Darüber hinaus ist auf Grund der internen Zu- und Abführung durch die Capto®-Schnittstelle eine höhere Betriebssicherheit gegeben. Auch aus ergonomischer Sicht ist die Handhabung des innengekühlten Werkzeugsystems durch den Maschinenbediener einfacher auszuführen. So stellt der Werkzeugwechsel keinen wesentlichen Unterschied gegenüber dem konventioneller Werkzeugsysteme dar. Darüber hinaus weisen die für das innengekühlte Werkzeugsystem benötigten Einzelteile eine geringe Komplexität auf und sind ohne Sonderverfahren fertigbar.

3.1.3 A3 - Definition der zu untersuchenden Kühlfluide

Für eine effiziente Innenkühlung ist die Wahl des Kühlfluids von entscheidender Bedeutung. Als Entscheidungsgrundlage werden zu diesem Zweck folgende Stoffdaten herangezogen:

- spezifische Wärmekapazität c
- Wärmeleitfähigkeit k
- Dichte ρ bei $T = 20\text{ °C}$
- kinematische Viskosität ν bei $T = 20\text{ °C}$

Von besonderer Relevanz ist hierbei die spezifische Wärmekapazität c zur Beurteilung der Fähigkeit eines Mediums, Wärmeenergie zu speichern. Darüber hinaus ist die Wärmeleitfähigkeit k zur Beschreibung des quantitativen Wärmestroms \dot{Q} unter stationären Bedingungen von Relevanz. Für eine effiziente Kühlung der WSP ist eine hohe Wärmeleitfähigkeit k erforderlich. Eine Übersicht recherchierter Kühlfluide, welche für den Einsatz im innengekühlten Werkzeugsystem geeignet sind, ist in Tabelle 3-5 dargestellt.

Tabelle 3-5: Potenzielle Kühlfluide für den Einsatz im innengekühlten Werkzeugsystem

Kühlfluid	spezifische Wärmekapazität c	Wärmeleitfähigkeit k	Dichte ρ	kinematische Viskosität ν
	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	kg m^{-3}	10^{-6} Pa s
Wasser	4,184	0,6	998	1,004
Ethanol	2,430	0,173	789	1,52
½-Propylenglykol	2,500	0,201	1040	53,85
Glycerin	2,428	0,286	1260	1,48
Methanol	2,470	0,208	792	1,01
Duratherm 450	2,144	0,142	852	4,62
Fragoltherm X-40	1,630	0,13	924	4
Glysofor N	2,350	0,29	1120	18,75

Auf Grundlage der dargestellten Kühlfluide wird deutlich, dass Wasser die höchste spezifische Wärmekapazität c sowie die höchste Wärmeleitfähigkeit k bei der geringsten kinematischen Viskosität ν aufweist. Ferner ist keine kostenintensive Synthese notwendig. Somit erfüllt Wasser als Kühlfluid in besonderem Maße den Aspekt der Nachhaltigkeit. Das AP C2 zeigt ferner auf, dass geringere Kühlleistungen durch den Einsatz eines Wasser-Glykol-Gemisches erzielt werden. Ursächlich hierfür sind nachteilige Eigenschaften hinsichtlich der spezifischen Wärmekapazität c und der Wärmeleitfähigkeit k . Jedoch sind die im Glykol enthaltenen Korrosionsinhibitoren notwendig, um das innengekühlte Werkzeugsystem vor Oxidation zu schützen. Daher kommt ein Kühlfluid mit einem Mischungsverhältnis von 75 % Wasser und 25 % Glykol des Typs Glysofor N, Fa. WITTIG UMWELTCHEMIE GMBH, Graftschaff-Ringen, für die Zerspanuntersuchungen in AP E2 zum Einsatz.

3.2 Arbeitspaket B - Werkzeugentwicklung

3.2.1 B1 - Werkzeug- und Werkstoffmodellierung zur Prozesssimulation

Auf Grundlage der numerischen Simulationsmodelle werden quantitative Aussagen über die entstehenden Prozesskräfte und -temperaturen getätigt, welche während der Drehbearbeitung durch die in AP A1 definierten Prozessparameter auftreten. Hierbei sind insbesondere die resultierenden Zerspankraftkomponenten F_x und der Wärmestrom \dot{Q} für die Auslegung des innengekühlten Werkzeugsystems von Bedeutung. Die quantitative Ausprägung dieser Zielgrößen ist im Wesentlichen von Schnittparametern abhängig. Sowohl die Ermittlung als auch die anschließende Nutzung dieser Zielgrößen erfolgt auf Grundlage einer zweistufigen Vorgehensweise, Bild 3-13. Für deren Ermittlung werden im ersten Schritt nichtlineare Belastungssimulationen durchgeführt. Daran schließt sich der zweite Schritt an, welcher die Zielgrößen für die Entwicklung des Gesamtsystem zu weiteren Simulationen überführt. Die Auslegung der Innenkühlung erfolgt auf Basis der Computational Fluid Dynamics (CFD) unter Berücksichtigung des Wärmestroms \dot{Q} . Des Weiteren wird die belastungsgerechte Konstruktion sowie die technische Dichtigkeit des Werkzeughalters auf Basis der Zerspankraftkomponenten F_x unter Einsatz der Finite-Elemente-Methode (FEM) geprüft.

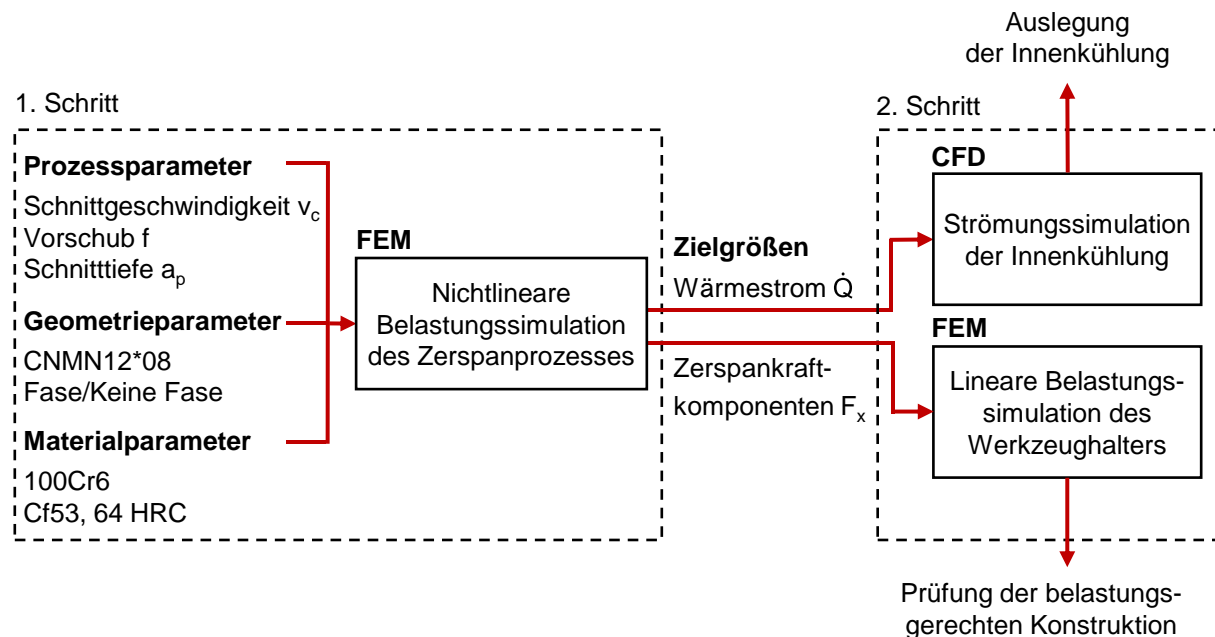


Bild 3-13: Zweistufige Vorgehensweise zur numerischen Auslegung der Innenkühlung sowie zur Prüfung eines belastungsgerechten Werkzeughalters

Auf Grund des kontinuierlichen Schnitts im Drehprozess können quasi-statische Eingriffsbedingungen angenommen werden. Dies bezieht sich u. a. auf den resultierenden Spanungsquerschnitt A_s , welcher nach Ausbildung einer definierten Spanwurzel durch konstante Kraft- und Temperaturwerte im Zerspanprozess charakterisiert wird. In Tabelle 3-6 sind die festgelegten Prozessparameter der nichtlinearen Belastungssimulation aufgeführt. Für die festgelegten Werkstoffe 100Cr6 und Cf53 sind jeweils zwei Parametersätze untersucht worden.

Tabelle 3-6: Parametersätze für die nichtlinearen Belastungssimulationen in Abhängigkeit des Werkstoffs

Werkstoff		100Cr6		Cf53, 64 HRC	
Parametersatz		1	2	1	2
Schnittgeschwindigkeit v_c	m min ⁻¹	180	200	150	180
Vorschub f	mm	0,3	0,4	0,1	0,1
Schnitttiefe a_p	mm	0,5	2	0,15	0,15

Ein weiterer Bestandteil der Untersuchungen ist die Werkzeugmakrogeometrie im Hinblick auf den Einsatz einer verrundeten Schneidkante oder einer Fase. Die nichtlinearen Belastungssimulationen wurden hierbei mit einem Schneidkantenradius von $r_\beta = 5 \mu\text{m}$ sowie einer Fase mit einer Länge von $b_F = 15 \mu\text{m}$ und einem Winkel von $\alpha_F = 35^\circ$ durchgeführt. Als Schneidstoff wurde die HW-Spezifikation K20 nach DIN ISO 513 [DIN513] eingesetzt. Auf Grund des hohen Elastizitätsmoduls Y und der geringen elasto-plastischen Verformung des Schneidstoffs, wurde ein starrer Werkzeugkörper für die nichtlineare Belastungssimulation definiert. Die physikalischen Eigenschaften basieren auf dem Datenblatt des Schneidstoffs HW-K20 der Fa. TIS WÄLZKÖRPERTECHNOLOGIE GMBH, Gauting [TIS19].

Ferner ist die Materialmodellierung der zu zerspanenden Werkstoffe von entscheidender Bedeutung für die resultierenden Ausprägungen der Zielgrößen. Die Implementierung beider Werkstoffe in die nichtlineare Belastungssimulation erfolgte auf Basis des JOHNSON-COOK Materialmodells. Die notwendigen Modellvariablen für Cf53 basieren auf dem Werkstoff C50 respektive den Arbeiten von BUDAK ET AL. [BUD08]. Die physikalischen Eigenschaften sind aus dem Datenblatt der Fa. DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE SPECIALTY STEEL GMBH & CO. KG, Witten, entnommen [DEU16]. Für den Werkstoff 100Cr6 wurden die Modellvariablen von SHROT ET AL. eingesetzt [SHR12]. Weitere Werkstoffdaten basieren auf dem Datenblatt der Fa. IBC WÄLZLAGER GMBH, Solms-Oberbiel [IBC19]. Für die Kontaktreibung zwischen Werkzeug und ablaufendem Span wurde das Shear-Modell mit einem Reibfaktor von $m_R = 0,6$ definiert. Als thermische Randbedingungen der Randzonen von Werkstoff und Werkzeug wurde eine Raumtemperatur von $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ angenommen. Im Hinblick auf die Eingriffsbedingungen im Drehprozess wurde ein Wirkspanwinkel von $\gamma_x = 6^\circ$ sowie ein Einstellwinkel von $\kappa = 5^\circ$ definiert.

3.2.2 B2 - Prozess- und geometrieabhängige Werkzeugbelastungssimulation

Die vollfaktorielle Versuchsdurchführung der nichtlinearen Belastungssimulationen erfolgte auf unter Verwendung von DEFORM v12, Fa. SCIENTIFIC FORMING TECHNOLOGIES CORPORATION, Columbus, USA. Hierbei wurden die Ausprägungen der definierten Zielgrößen ermittelt. Die Auswertung der thermischen Last basiert auf dem resultierenden Wärmestrom \dot{Q} , welcher sich in der Kontaktzone zwischen Werkzeug und Span einstellt. Eine exemplarische Darstellung der resultierenden Temperaturverteilung nach Ausbildung einer konstanten Spanwurzel ist in **Bild 3-14** für den Werkstoff 100Cr6 als direkte Folge des Wärmestroms \dot{Q} dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Kontaktzone eine geringe lokale Auflösung und zeitgleich einen hohe Temperaturvarianz aufzeigt.

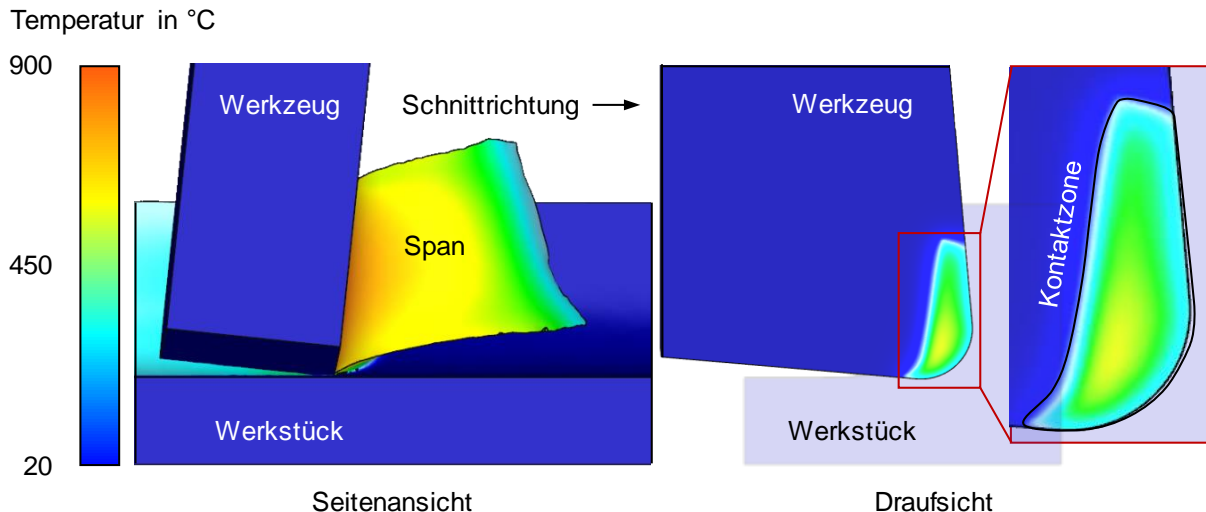


Bild 3-14: Temperaturverteilung im Span sowie temperaturabhängige Kontaktzone auf dem Werkzeug während der spanenden Bearbeitung von 100Cr6

Im Hinblick auf die Zerspankraftkomponenten F_x wurde der Fokus auf die resultierende Schnittkraft F_c gelegt, **Bild 3-15a**. Es ist für Cf53 ersichtlich, dass die Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit v_c einen unwesentlichen Einfluss auf die Schnittkraft F_c aufweist. Höhere Schnittkräfte F_c sind insbesondere durch eine höhere Zugfestigkeit R_m sowie durch Erhöhung des Spanungsquerschnitts A_s feststellbar. Darüber hinaus weist der Einsatz von Fasen im Allgemeinen einen Anstieg der Schnittkraft F_c von ca. 20 % gegenüber Schneidkantenradien auf. Ursächlich hierfür ist der größere Scherwinkel Φ in der primären Scherzone des Werkstücks.

Ferner sollte die Untersuchung verschiedener Werkzeugmakrogeometrien aufzeigen, wie sich maximale Werkzeugtemperatur $T_{WZ,max}$ und der Wärmestrom \dot{Q} unter Einsatz von Schneidkantenradius oder Fase verhalten. Hierbei konnte festgestellt werden, dass höhere maximale Werkzeugtemperaturen $T_{WZ,max}$ durch Einsatz von gefassten Werkzeugen entstehen. Es liegt somit eine Geometrieabhängigkeit vor, **Bild 3-15b**. Diese Korrelation ist auch im Hinblick die Ergebnisse des resultierenden Wärmestroms \dot{Q} feststellbar, **Bild 3-15c**. Ursächlich für die Vergrößerung der thermischen Last, welche sich durch die Applikation von Fasen entwickelt, ist eine höhere Umformarbeit sowie eine höhere Kontaktlänge während des Spanablaufs. Neben der numerischen Lösung erfolgte zusätzlich die Ermittlung der thermischen Last als analytisches Ergebnis auf Basis einer empirischen Modellgleichung, **Formel 3-1**. Diese ermöglicht eine parameterabhängige Berechnung des resultierenden Wärmestroms \dot{Q} [TAK81]. Zur Auslegung der Innenkühlung wurde die höchste thermo-mechanische Belastung aus den nichtlinearen Belastungssimulationen genutzt. Im vorliegenden Fall stellt dies die Bearbeitung von 100Cr6 mit gefasster Werkzeugschneide dar.

$$\dot{Q} = 1,68 \cdot a_p \cdot f^{0,15} \cdot v_c^{0,85} \quad (3-1)$$

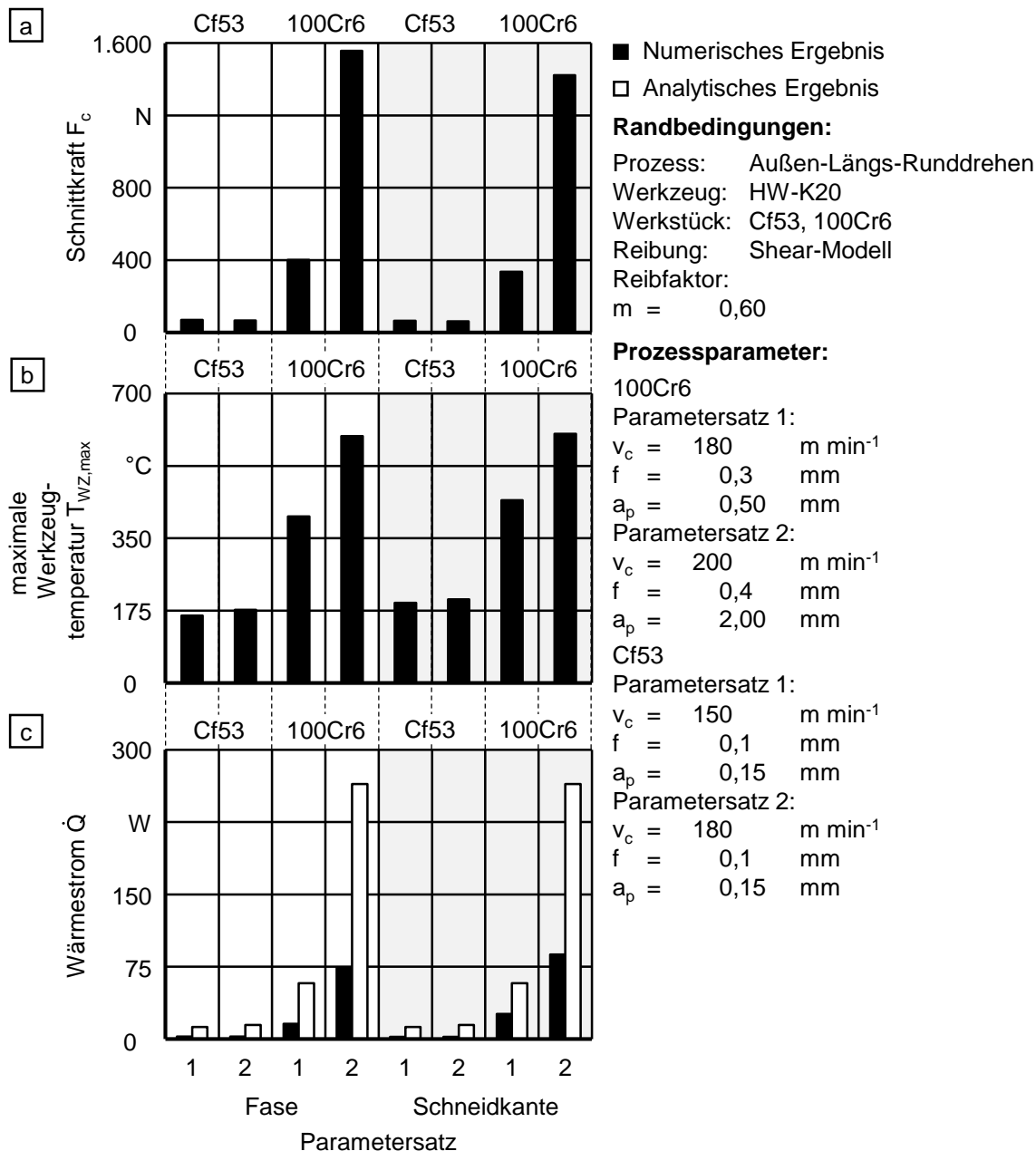


Bild 3-15: Ergebnis der Belastungssimulationen für Cf53 und 100Cr6 unter variierenden Prozessparametern;
 a) resultierende Schnittkraft F_c ; b) maximale Werkzeugtemperatur T_{WZ} ;
 c) analytischer und numerischer Wärmestrom \dot{Q} im Bereich der Kontaktzone

3.2.3 B3 - Entwicklung der Kontaktgeometrie zum Werkzeughalter

Der detaillierte Gesamtentwurf des innengekühlten Werkzeugsystems basiert auf dem Vorentwurf 1. Hierbei wird die Schnittstelle der Kontaktgeometrie zum Werkzeughalter durch einen Sitz aus HW realisiert, welcher unterhalb der WSP positioniert ist. Neben der Stütz- und der Positionierfunktion dient der Sitz der Führung des Kühlfluids. In Absprache mit EMAG sowie TESCH wurde im ersten Iterationsschritt eine externe Führung des Kühlfluids außerhalb des Werkzeughalters favorisiert. In Konsequenz wurde ein u-förmiger Strömungsverlauf definiert. Hierbei erfolgen Zu- und Abfuhr des Kühlfluids senkrecht zur Spanfläche. Die geometrische Auslegung des Strömungsverlaufs wurde im Detail durch CFD-Simulationen in AP C2

festgelegt. In Bild 3-16 sind unterschiedliche Varianten des Kühlkörpers dargestellt. Das Ziel der Varianten war die Realisierung eines Strömungsverlaufs nahe der WSP-Schneide. Der Kühlkörper der favorisierten Variante basiert auf einer zweiteiligen Lösung, welche sich geometrisch an der WSP orientiert und variierende WSP-Dicken s analog zum Vorentwurf 3 ermöglicht. Zu diesem Zweck werden Ausgleichsplatten mit verschiedenen Höhen, welche als Höhenmaß bezeichnet werden, zwischen Kühlkörper und Werkzeughalter positioniert. Weiterhin ist zur effizienten Wärmeleitung eine Kühlplatte, welche eine hohe Wärmeleitfähigkeit k aufweisen soll, auf dem Kühlkörper vorgesehen. Die Dichtung zwischen Kühlkörper und Kühlplatte erfolgt durch eine Klebverbindung basierend auf einem Zweikomponenten-Epoxidharz. Die Schnittstelle zwischen Kühlkörper und Höhenmaß wird mit Hilfe eines lösaren Flächen-dichtmittels realisiert. Die Auswahl von Klebstoff sowie Dichtmittel erfolgt auf Basis des resultierenden Drucks p der Innenkühlung in AP C2.

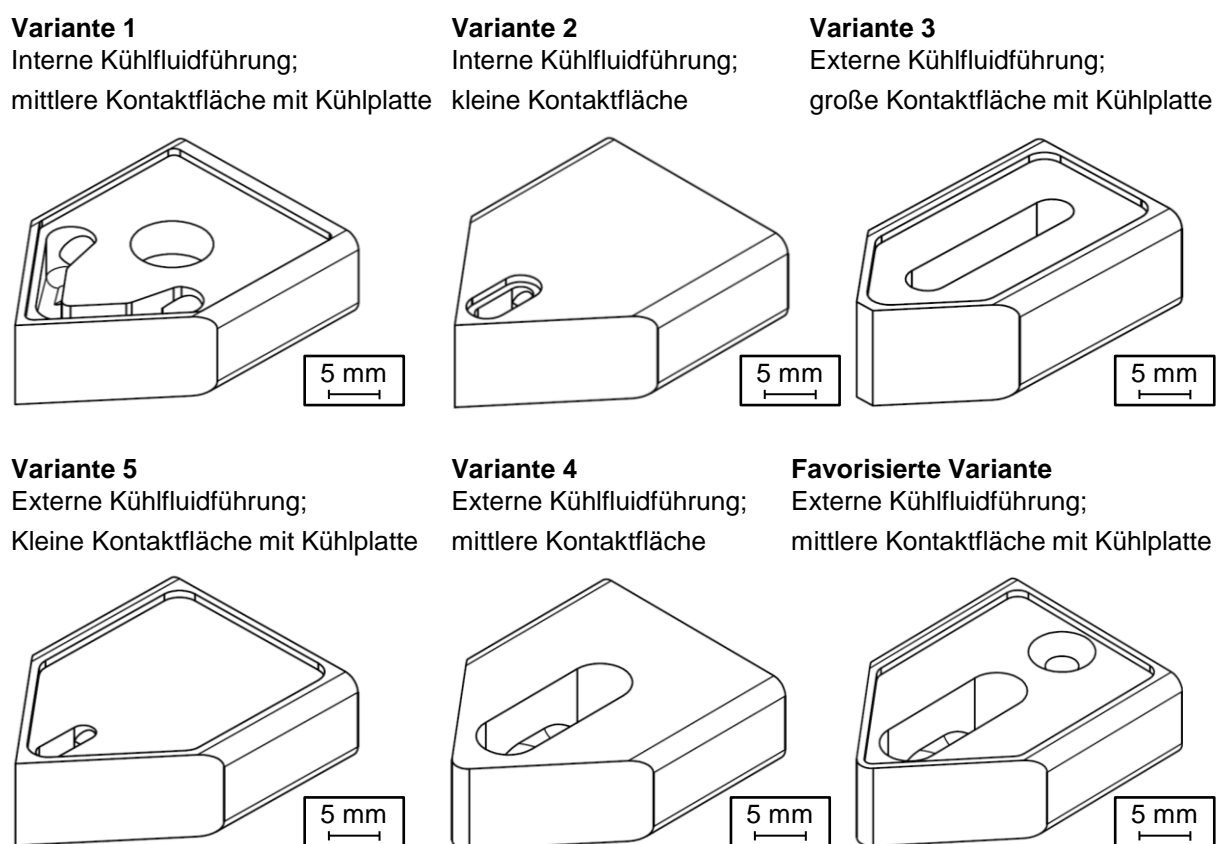


Bild 3-16: Darstellung unterschiedlicher Varianten des Kühlkörpers sowie favorisierte Lösung

Die Führung des Kühlfluids erfolgt im Anschluss innerhalb des Werkzeughalters durch Bohrungen unter einem definierten Winkel. Die Schnittstelle zur Übergabe des Kühlfluids in die flexiblen Kühlleitungen wird durch Steckverbinder realisiert. Eine Prüfung der Nachgiebigkeit sowie der technischen Dichtheit erfolgte in AP C1 auf Basis der aus AP B2 maximal auftretenden Zerspankraftkomponenten F_x .

3.2.4 B4 - Fertigung der Werkzeuge

Die Fertigung von HW-WSP gemäß AP A1 erfolgte für die technologischen Untersuchungen ohne Innenkühlung, welche als Referenz für die Ermittlung der Leistungsfähigkeit der Innenkühlung dienen. Die eingesetzte Spezifikation HW-K40, welche durch TESCH zur Verfügung gestellt wurde, weist eine hinreichende Vergleichbarkeit hinsichtlich der in den nichtlinearen Belastungssimulationen definierten mechanischen und thermischen Schneidstoffeigenschaften von HW-K20 auf. Die WSP sind in unterschiedlichen Dicken auf von $s = 1,58$ bis $4,76$ mm gefertigt worden. Diese WSP-Dicken s wurden auf Grundlage der thermischen Analysen in AP C2 als zielführend identifiziert. Aus der Anforderungsliste in AP A2 ist ersichtlich, dass keine Modifikationen der WSP vorgesehen sind. Somit entfallen zusätzliche Entwicklungsleistungen sowie die Herstellung kostenintensiver Sondergeometrien. In Konsequenz erhöht sich die industrielle Akzeptanz des innengekühlten Werkzeugsystems.

Nach der Fertigung erfolgte eine Charakterisierung der WSP, welche Bestandteil der Zerspanuntersuchungen im Rahmen des AP E2 ist. Zu diesem Zweck wurde mit Hilfe des auf der Streifenlichtprojektion basierenden Messsystems MicroCADpico, Fa. GFMESTECHNIK GMBH, Teltow, die Mikrogeometrie der WSP im Bereich der Schneidkante vermessen, Tabelle 3-7.

Tabelle 3-7: Übersicht der charakterisierten Werkzeugmikrogeometrie

Mikrogeometrie	Einheit	Wert
Allgemein		
Arithmetischer Mittelwert der Profilordinaten R_a auf der Spanfläche	μm	$1,35 \pm 0,03$
Gemittelte Rautiefe R_z auf der Spanfläche	μm	$7,45 \pm 0,24$
WSP mit Schneidkante		
Schneidkantenradius r_β	μm	$4,21 \pm 0,88$
WSP mit Fase		
Fasenbreite b_F	μm	$155,39 \pm 8,62$
Fasenwinkel α_F	$^\circ$	$34,80 \pm 1,56$

3.3 Arbeitspaket C - Entwicklung von Werkzeughalter und -aufnahme

3.3.1 C1 - Entwicklung der geschlossenen Kontaktgeometrie zur Wendeschneidplatte

Im Hinblick auf die iterative Entwicklung der geschlossenen Kontaktgeometrie bestand eine Wechselwirkung mit AP B3. So kann zwar der physikalische Mechanismus des Wärmetransports isoliert betrachtet werden, jedoch ist die Funktionsfähigkeit der mechanischen Schnittstelle zu berücksichtigen. Auf Grund der geschlossenen Innenkühlung ist im Schwerpunkt eine Konduktion zwischen Festkörpern sowie eine erzwungene Konvektion auf Basis des Kühlfluids für den Wärmetransport vorgesehen. Darüber hinaus bietet ein geschlossenes Gesamtsystem den Vorteil reduzierter Rüstzeiten im Hinblick auf die WSP sowie die Gewährleistung eines kontinuierlichen Betriebs der Innenkühlung.

Die Entwicklung sieht für den Wärmetransport von der WSP zum HW-Sitz ein Kühlelement auf Basis einer Kühlplatte vor. Durch die Wahl von sauerstofffreiem Kupfer als Werkstoff wird eine hohe Wärmeleitfähigkeit k sichergestellt. Die Positionierung und die Fixierung der Kühlplatte erfolgten mechanisch. So wird ein Formschluss durch den Kühlkörper sowie ein Kraftschluss durch die aufliegende WSP realisiert. Die technische Dichtheit wird auf Grundlage von AP B3 durch eine Klebverbindung realisiert. Zusätzlich wird die Kühl- respektive Kupferplatte mit einem Übermaß gefertigt. Durch Kontakt mit der WSP und der daraus resultierenden elastoplastischen Verformung kann somit ein direkter Kontakt durch Kompensation fertigungsbedingter Form- und Lagetoleranzen sichergestellt werden. Sollte kein effizienter Wärmetransport auf Grund von Lufteinschlüssen ermöglicht werden, ist der Einsatz von Wärmeleitpasten oder Folien basierend auf Graphen möglich. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass Wärmeleitpasten mit $k = 5$ bis $10 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ eine deutlich geringe Wärmeleitfähigkeit gegenüber Kupfer mit $k = 400 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ sowie Graphen mit $k = 700$ bis $1.950 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ aufweisen. Darüber hinaus bestätigen CFD-Simulationen in AP C2, dass auf Basis der resultierenden Temperaturen auf der Werkzeugunterseite T_{WZU} ein sicherer Betrieb der zusätzlichen Wärmeleitelemente möglich ist.

Die Fixierung der WSP sowie der darunter liegenden Kühlelemente wird mit Hilfe von Spannfingern realisiert. Um den Einsatz industriell relevanter WSP zu gewährleisten, wurden zwei Spannfinger entwickelt, welche es ermöglichen, Werkzeuge ohne oder mit Bohrung aufzunehmen. Nach Finalisierung des Gesamtentwurfs erfolgte ferner die Prüfung einer belastungsgerechten Konstruktion auf Basis der prognostizierten Zerspankraftkomponenten F_x aus AP B2. Dazu wurden lineare FEM-Simulationen der Baugruppe, bestehend aus den mechanischen Teilkomponenten, in ANSYS v19.2, Fa. ANSYS Inc., Berkeley, USA, durchgeführt. Schwerpunkt der Analysen war die maximale Verformung der WSP sowie die Kontaktbedingungen zwischen Kupferplatte und Kühlkörper zur Sicherstellung der technischen Dichtheit. Es ist in [Bild 3-17](#) ersichtlich, dass durch eine Schnittkraft von $F_c = 1.557 \text{ N}$ eine zu vernachlässigende Gesamtverformung der mechanischen Teilkomponenten u im Bereich des Kühlkörpers auftritt. Die Bewertung des Spalts zwischen Kühlkörper und Kupferplatte s_p erfolgte unter Annahme keiner auftretenden Prozesskraft, jedoch unter Druckbeanspruchung durch das Kühlfluid. Hierbei ist ersichtlich, dass der Spalt an der direkten Grenzfläche der Kühlfluidführung $s_p = 0 \text{ }\mu\text{m}$ beträgt. Ausschließlich in den Randbereichen sind größere Spalte mit $s_p = - 2,55 \text{ }\mu\text{m}$ feststellbar. Somit ist von keiner Leckage während des Betriebs auszugehen.

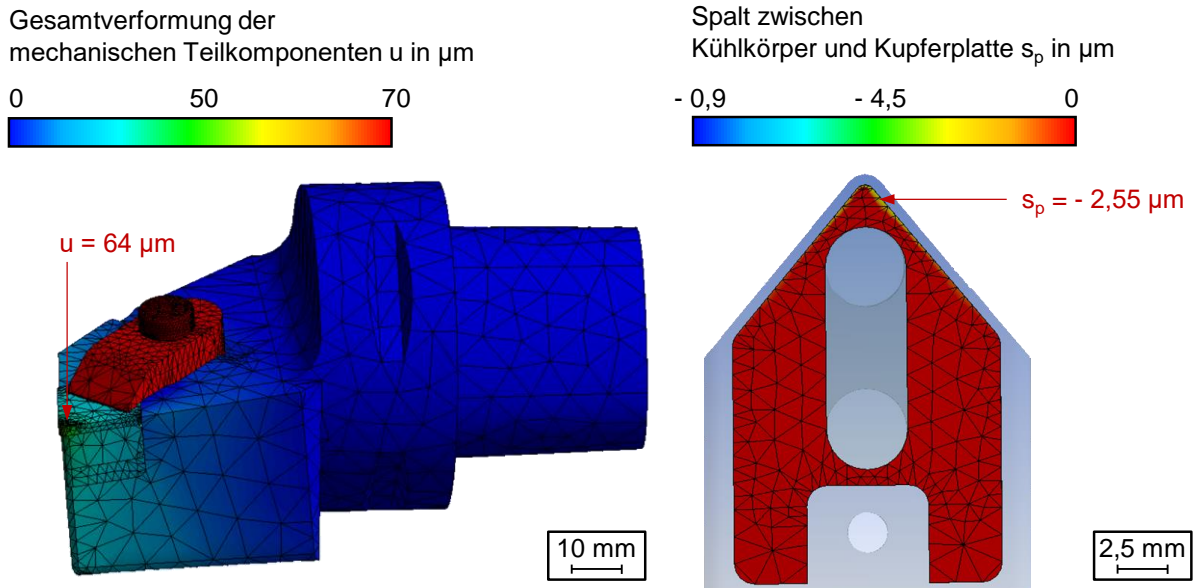
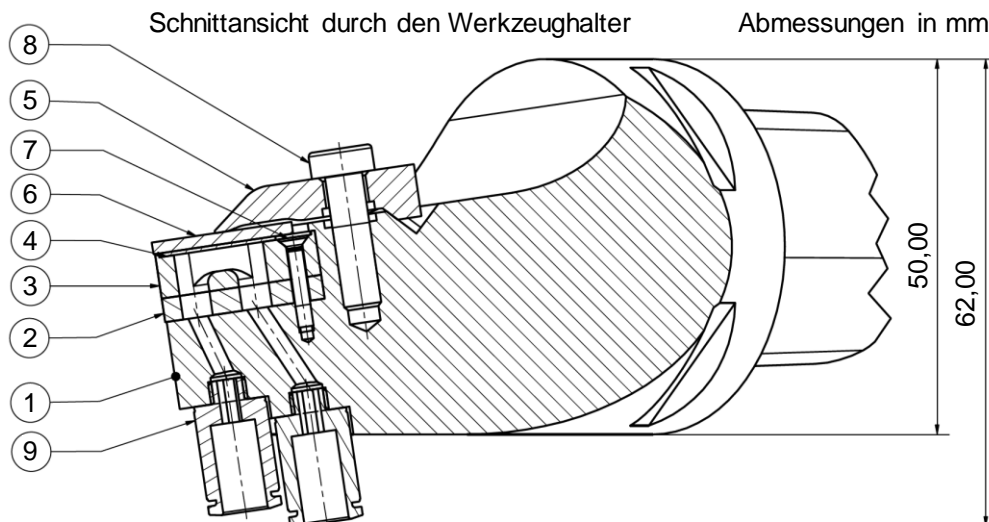


Bild 3-17: Lineare FEM-Simulationen zur Bewertung von Gesamtverformung u und Spalt s_p

Der Gesamtentwurf der mechanischen Teilkomponenten des innengekühlten Gesamtsystems liegt somit als Ergebnis 3 vor. In **Bild 3-18** ist eine exemplarische Schnittansicht des Werkzeughalters mit Capto®-Polygon C5 und externer Kühlfluidführung für die Aufnahme im Blockstahlhalter dargestellt.



Stückliste

Position	Bezeichnung	Position	
1	Werkzeughalter DCLNL-C5	6	CNMN120108
2	Höhenmaß $h = 3,18$ mm	7	Senkkopfschraube
3	Kühlkörper	8	Zylinderkopfschraube
4	Kupferplatte	9	Steckverbinder
5	Spannfinger		

Bild 3-18: Schnittdarstellung und exemplarische Stückliste des innengekühlten Gesamtsystems mit externer Kühlfluidführung

Zusätzlich wurde mit der Spezifikation DCLNL2020 ein konventioneller Vierkant-Werkzeughalter entwickelt, welcher durch standardisierte VDI-Werkzeugaufnahmen aufgenommen werden kann. Somit ist das System auch unabhängig von der Capto®-Schnittstelle einsetzbar.

Innerhalb der iterativen Entwicklung wurde ferner eine Lösung realisiert, welche die interne Kühlfluidführung unter Verwendung der Capto®-Schnittstelle ermöglicht, Bild 3-19. Durch das Entfernen der Steckverbinder und eine Anpassung der Kühlfluidführung wird eine einfachere Handhabung des Werkzeugsystems realisiert und somit die Rüstzeit reduziert. Die interne Kühlfluidführung setzt jedoch zusätzliche Komponenten voraus, welche in AP C3 dargestellt sind.

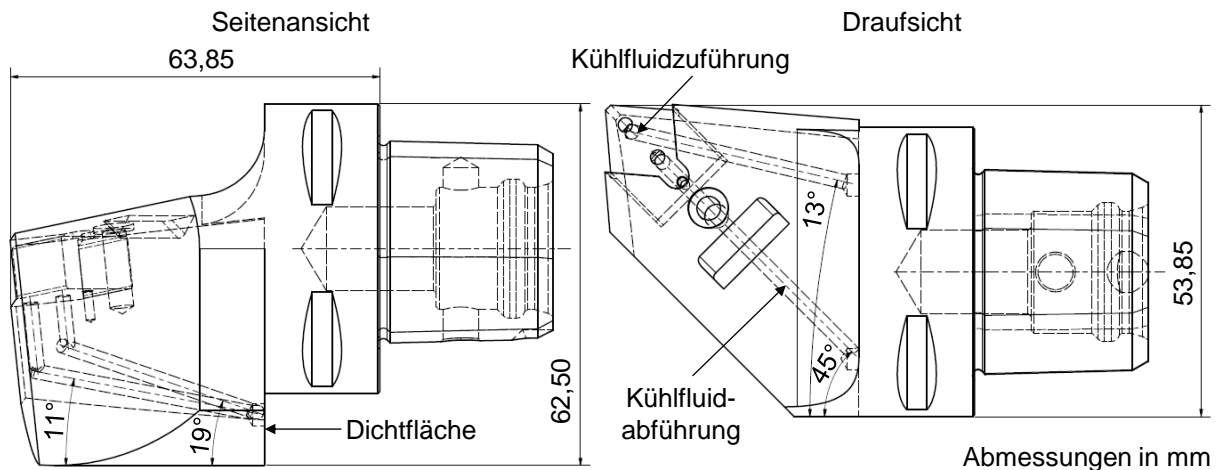


Bild 3-19: Darstellung des innengekühlten Gesamtsystems mit interner Kühlfluidführung

3.3.2 C2 - Entwicklung des Strömungsverlaufs von Kühlmittelzu- und -abfuhr für den effektiven Wärmeaustausch durch Einsatz von CFD

Der aus AP B2 ermittelte Wärmestrom \dot{Q} wurde für die numerische Auslegung des Strömungsverlaufs der Innenkühlung genutzt. Die Durchführung von Wärme- sowie Strömungssimulationen erfolgte durch Einsatz von ANSYS v19.2, Fa. ANSYS INC., Berkeley, USA. Für die initiale Untersuchung des Temperaturfeldes innerhalb der WSP wurden stationäre Wärmesimulationen unter Einsatz des numerisch ermittelten Wärmestroms $\dot{Q} = 87,82 \text{ W}$ herangezogen. Neben der WSP-Dicke s wurde hierbei die Temperatur der Werkzeugunterseite T_{WZU} , welche als konstante Kühlfluidtemperatur T_{ein} definiert wurde, variiert. Auf Grundlage von Bild 3-20 ist feststellbar, dass insbesondere die WSP-Dicke s einen relevanten Einfluss auf die maximale Werkzeugtemperatur $T_{WZ,max}$ besitzt. Durch die Reduzierung der WSP-Dicke von $s = 4,76 \text{ mm}$ auf $s = 1,58 \text{ mm}$ ist hierbei eine prozentuale Abnahme der maximalen Werkzeugtemperatur $T_{WZ,max}$ von 22 % feststellbar. Jedoch ist ein Kompromiss aus WSP-Dicke s und thermo-mechanischer Belastung anzustreben. Die Reduzierung der Werkzeugunterseitentemperatur von $T_{WZU} = 20 \text{ °C}$ auf $T_{WZU} = -20 \text{ °C}$ führt dagegen mit 5 bis 6 % zu einer geringeren prozentualen Reduzierung der maximalen Werkzeugtemperatur $T_{WZ,max}$.

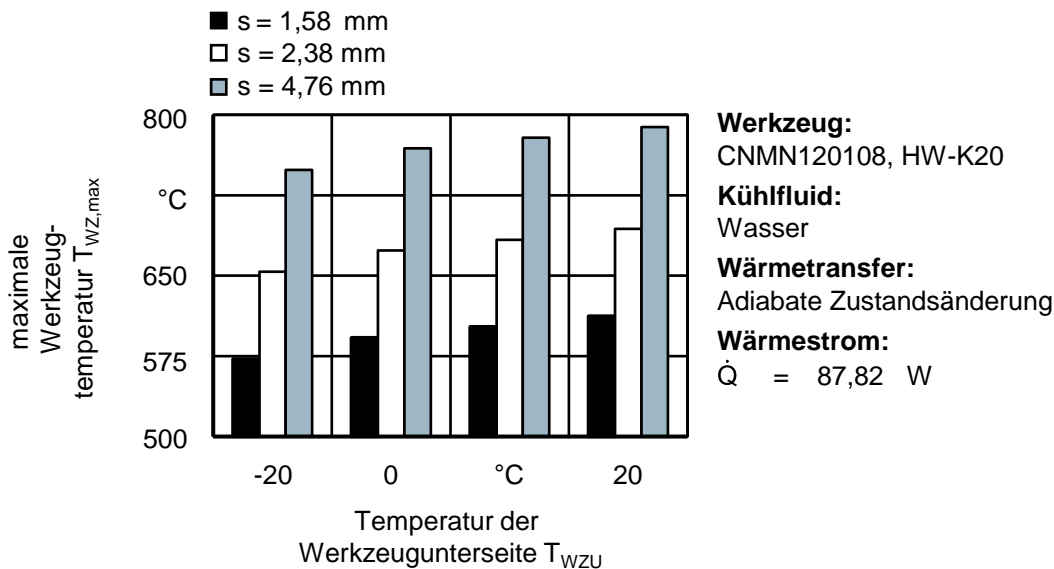


Bild 3-20: Stationäre Simulationsergebnisse des thermischen Verhaltens von WSP unter definiertem Wärmestrom \dot{Q} in der Kontaktzone

Der physikalische Mechanismus einer erzwungenen Konvektion durch das strömende Kühlfluid ist im Hinblick auf den Transport thermischer Energie weiterhin von Relevanz. Insbesondere die räumliche Realisierung der Kühlkanäle ist hierbei von entscheidender Bedeutung. Auf Basis strömungstechnischer Grundlagen wurden verschiedene Varianten der Strömungsführung untersucht. Zusätzlich sind jedoch auch stoff- und strömungsabhängige Einflussgrößen für die Effizienz der Innenkühlung von Bedeutung. Die Bewertung der Kühleffizienz erfolgte auf Basis eines Geometriemodells des favorisierten Gesamtentwurfs, **Bild 3-21**.

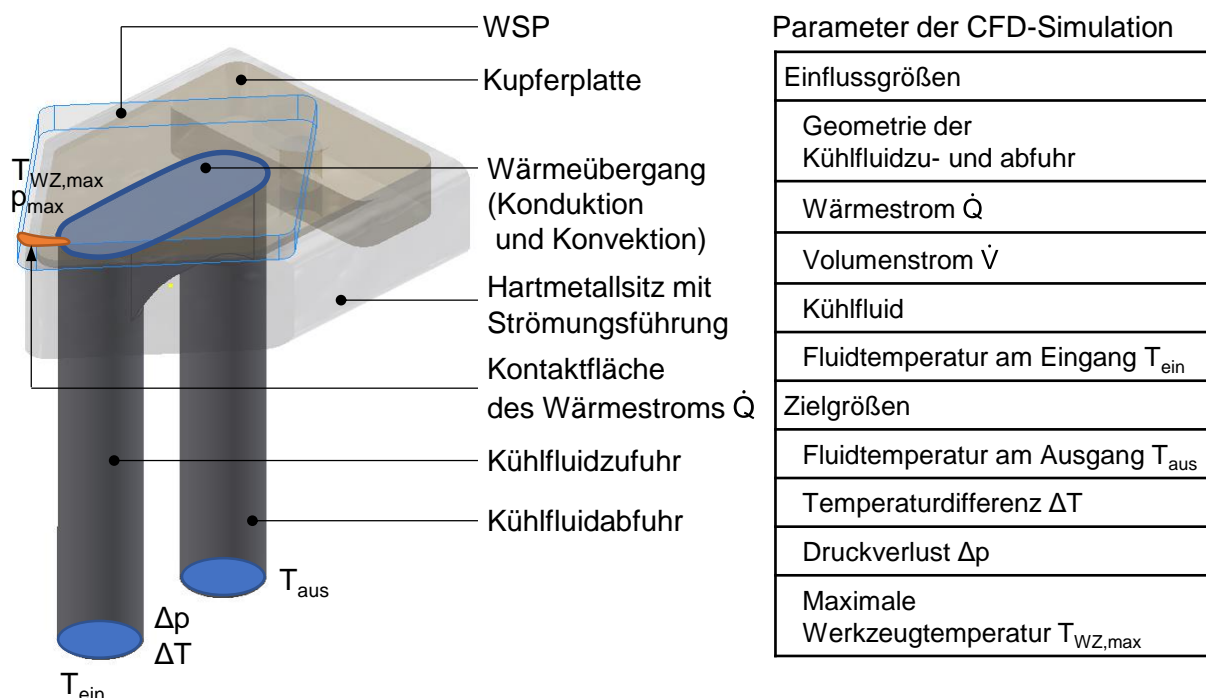


Bild 3-21: Geometriemodell zur Untersuchung des Einsatzverhaltens der Innenkühlung im Bereich des Werkzeughalters mit den relevanten Eingangs- und Zielgrößen

Neben dem Wärmestrom \dot{Q} sind das einzusetzende Kühlfluid sowie der realisierbare Volumenstrom \dot{V} als Zielgröße definiert. Die Ausprägung der Zielgrößen, insbesondere des

Druckverlustes Δp , der Temperaturdifferenz des Kühlfluids ΔT und der maximalen Werkzeugtemperatur $T_{WZ,max}$ sind für die Auslegung der Hydraulikkomponenten von Bedeutung. Die Einflussgrößen wurden dabei innerhalb folgender Grenzen variiert, Tabelle 3-8.

Tabelle 3-8: Parameterfeld der zu untersuchenden Einflussgrößen

Einflussgrößen	Einheit	Werte
Wärmestrom \dot{Q}	W	87,82
Kühlfluid	1	Wasser
Volumenstrom \dot{V}	l min ⁻¹	0,6 / 3 / 6 / 9 / 30
Fluidtemperatur am Eingang T_{ein}	°C	0 / 10 / 20 / 30

Entsprechend Bild 3-22 ist ein quadratisches Wachstum des Druckverlustes Δp in Abhängigkeit des Volumenstroms \dot{V} feststellbar. Darüber hinaus steigt der Druckverlust Δp durch Variation der Kühlkörpergeometrie. Insbesondere verrundete Kanten innerhalb des Kühlkörpers führen zu einer Reduzierung des Druckverlustes Δp . Ursächlich hierfür ist eine Reduzierung von Strömungsabrissen und Turbulenzen in den Umlenkungsbereichen der Kühlfluidführung.

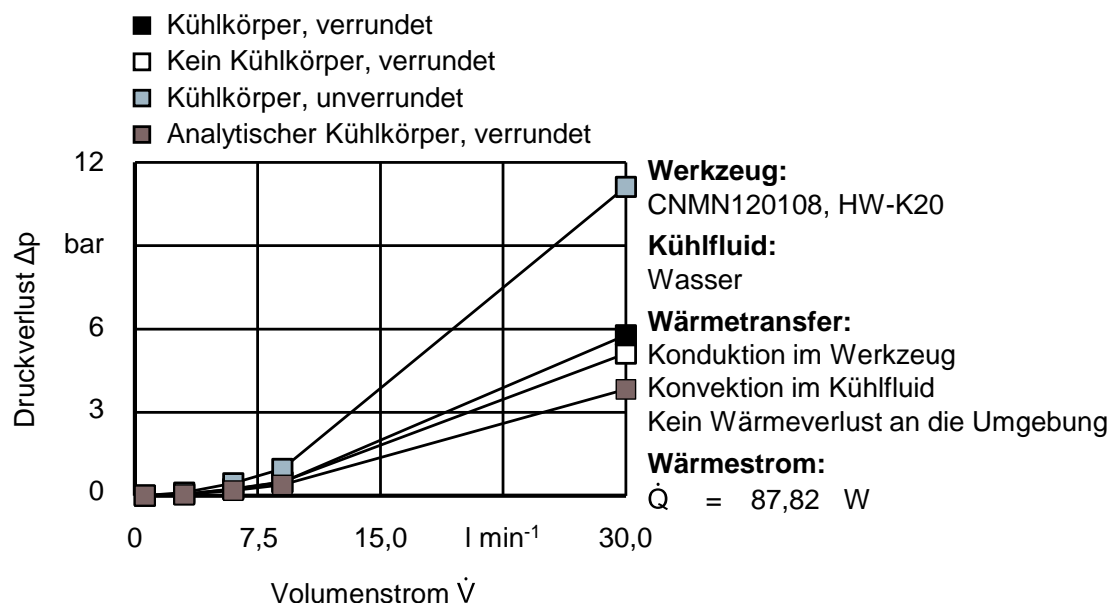


Bild 3-22: Analytischer und numerischer ermittelter Druckverlust Δp in Abhängigkeit des Volumenstroms \dot{V} sowie der Strömungsführung

Im Hinblick auf die Leistungsfähigkeit der Innenkühlung, welche durch Ermittlung der Temperaturdifferenz ΔT quantifiziert werden kann, stellt der Volumenstrom \dot{V} die entscheidende Einflussgröße dar, Bild 3-23. So liegt ein degressiver Anstieg der Temperaturdifferenz ΔT durch Erhöhung des Volumenstroms \dot{V} vor. Darüber hinaus ist feststellbar, dass der Volumenstrom \dot{V} gegenüber der Kühlfluidtemperatur am Eingang T_{ein} einen höheren Einfluss auf die Temperaturdifferenz ΔT besitzt. So kann festgestellt werden, dass eine prozentuale Steigerung der Temperaturdifferenz ΔT um ca. 80 % von $\dot{V} = 0,6 \text{ l min}^{-1}$ auf $\dot{V} = 9 \text{ l min}^{-1}$ bei $T_{ein} = 20 \text{ °C}$ realisiert werden kann. Die prozentuale Steigerung der Temperaturdifferenz ΔT auf Basis der Reduzierung der Kühlfluidtemperatur am Eingang von $T_{ein} = 30 \text{ °C}$ auf $T_{ein} = 0 \text{ °C}$ beträgt bei $\dot{V} = 9 \text{ l min}^{-1}$ im Vergleich 12 %. In Konsequenz ist ein Kompromiss aus den Größen

Volumenstrom \dot{V} , Druckverlust Δp und Temperaturdifferenz ΔT für einen wirtschaftlichen Betrieb der Innenkühlung zu identifizieren.

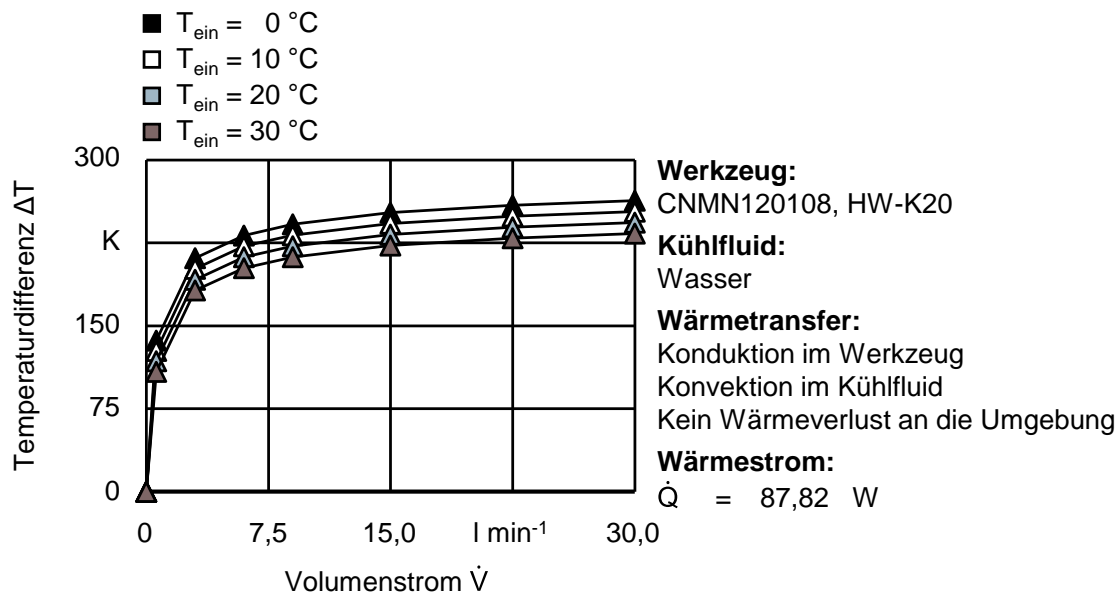


Bild 3-23: Numerische ermittelte Temperaturdifferenz ΔT in Abhängigkeit des Volumenstroms \dot{V} sowie der Fluidtemperatur am Eingang T_{ein}

Ferner wurden numerische Simulationen auf Basis von Wasser-Glykol-Gemischen durchgeführt. Diese zeigen jedoch auf Grund der thermischen Eigenschaften des Gemischs kontinuierlich geringere Kühlleistungen gegenüber dem Einsatz von Wasser als Kühlfluid auf, [Bild 3-24](#). Jedoch ist es durch die im Glykol enthaltenen Korrosionsinhibitoren möglich, die Oxidation innerhalb des strömungsführenden Hartmetallsitzes effektiv zu verhindern.

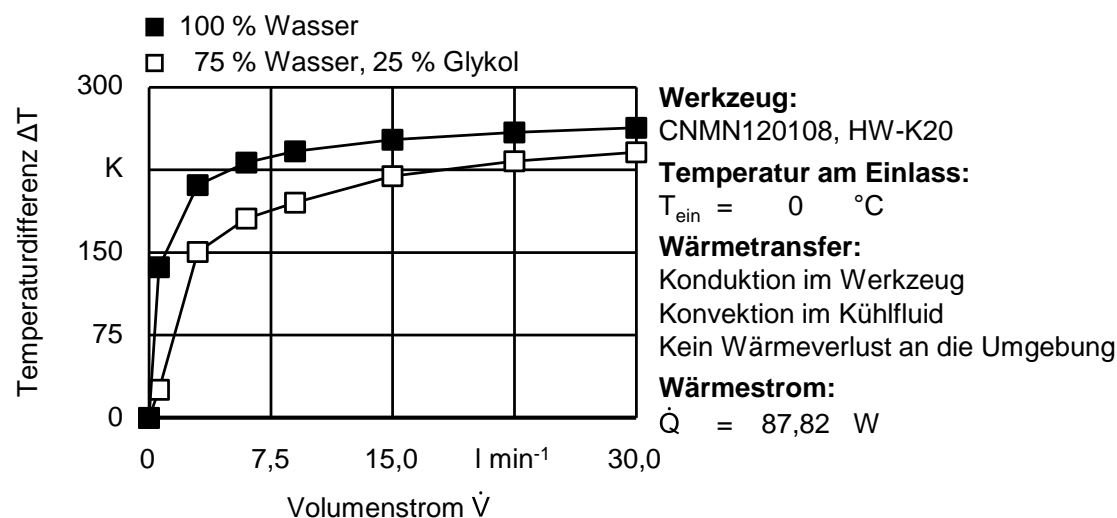


Bild 3-24: Numerische ermittelte Temperaturdifferenz ΔT in Abhängigkeit des eingesetzten Kühlfluids
 Die Ermittlung der Gesamtleistung P_{ges} der Innenkühlung erfolgte unter Berücksichtigung der Pumpe, des Kühlaggregats sowie des Kühlkörpers. Innerhalb dieser Berechnung wurden Rohrleitungen und Zuführungen auf Grund einer variierenden Implementierung in den Werkzeugmaschinen nicht betrachtet. Eine tabellarische Übersicht der Gesamtleistung P_{ges} basierend auf den relevanten Einfluss- und Zielgrößen ist in [Tabelle 3-9](#) gegeben. Aus den CFD-

Simulationen ergeben sich für die Innenkühlung mit Kühlaggregat somit folgende Einsatzempfehlungen und Leistungsbedarfe:

Volumenstrom $\dot{V} = 6 \text{ l min}^{-1}$

- Kühlfliuidtemperatur am Eingang $T_{\text{ein}} = 0 \text{ °C}$
- Raumtemperatur
- Leistung der Pumpe $P_P = 2,60 \text{ W}$
- Leistung des Kühlaggregats $P_{KA} = 23,59 \text{ W}$
- Raumtemperatur $T = 30 \text{ °C}$

Tabelle 3-9: Gesamtleistung P_{ges} der Innenkühlung
 in Abhängigkeit der relevanten Einfluss- und Zielgrößen

Kühlfliuid- temperatur am Eingang T_{ein}	Volumenstrom \dot{V}	Gesamt- leistung P_{ges}	Maximale Werkzeug- temperatur T_{max}
°C	l min^{-1}	W	°C
0	0,6	23,18	817,79
0	3,0	16,30	744,35
0	6,0	26,19	720,84
0	9,0	29,06	710,06
0	30,0	339,72	691,41
10	0,6	14,81	827,21
10	3,0	8,56	753,51
10	6,0	17,62	730,71
10	9,0	21,44	719,95
10	30,0	330,69	701,33
20	0,6	7,10	836,64
20	3,0	4,33	762,82
20	6,0	9,82	740,57
20	9,0	14,39	729,84
20	30,0	322,10	711,25
30	0,6	0,01	846,06
30	3,0	0,32	772,25
30	6,0	2,60	750,44
30	9,0	8,01	739,73
30	30,0	314,41	721,17

3.3.3 C3 - Entwicklung des Anschlusses an das Hydraulik- und Messtechniksystem

Der Einsatz einer externen Kühlfluidführung ermöglicht die Verwendung konventioneller Werkzeugrevolver. Entsprechend der festgelegten Anforderungen an das Werkzeugsystem stellt die interne Kühlfluidführung jedoch die favorisierte Lösung für den Einsatz an Blockstahlhaltern dar, vgl. Tabelle 3-3. Die Umsetzung einer internen Kühlfluidführung mit Capto®-Schnittstelle erforderte die Entwicklung zusätzlicher Komponenten und die Modifikation von Normteilen, Bild 3-25a. Im Detail wird der Spanneinsatz um zusätzliche Bohrungen erweitert, um das Kühlfluid zum Werkzeughalter zu führen. Als Schnittstelle zwischen dem modifizierten Spanneinsatz und dem Werkzeughalter ist ein Spannaufsatz vorgesehen. Ferner ist durch die Integration zweier separater Kühlfluidzu- und -abführungen im Blockstahlhalter der Einsatz von links- und rechtsschneidenden Werkzeughaltern möglich. Eine Beeinflussung vorliegender Funktionalitäten, wie der Druckluftzufuhr, besteht durch die Integration des innengekühlten Werkzeugsystems nicht. Durch die Verwendung einer identischen Kühlfluidführung in den jeweiligen Varianten der Werkzeughalterspezifikation DCLNL ist weiterhin eine Interoperabilität von externer und interner Kühlfluidführung mit dem Hydraulik- und dem Messtechniksystem gewährleistet. Folglich ist ein paralleler Einsatz mehrerer innengekühlter Werkzeuge realisierbar.

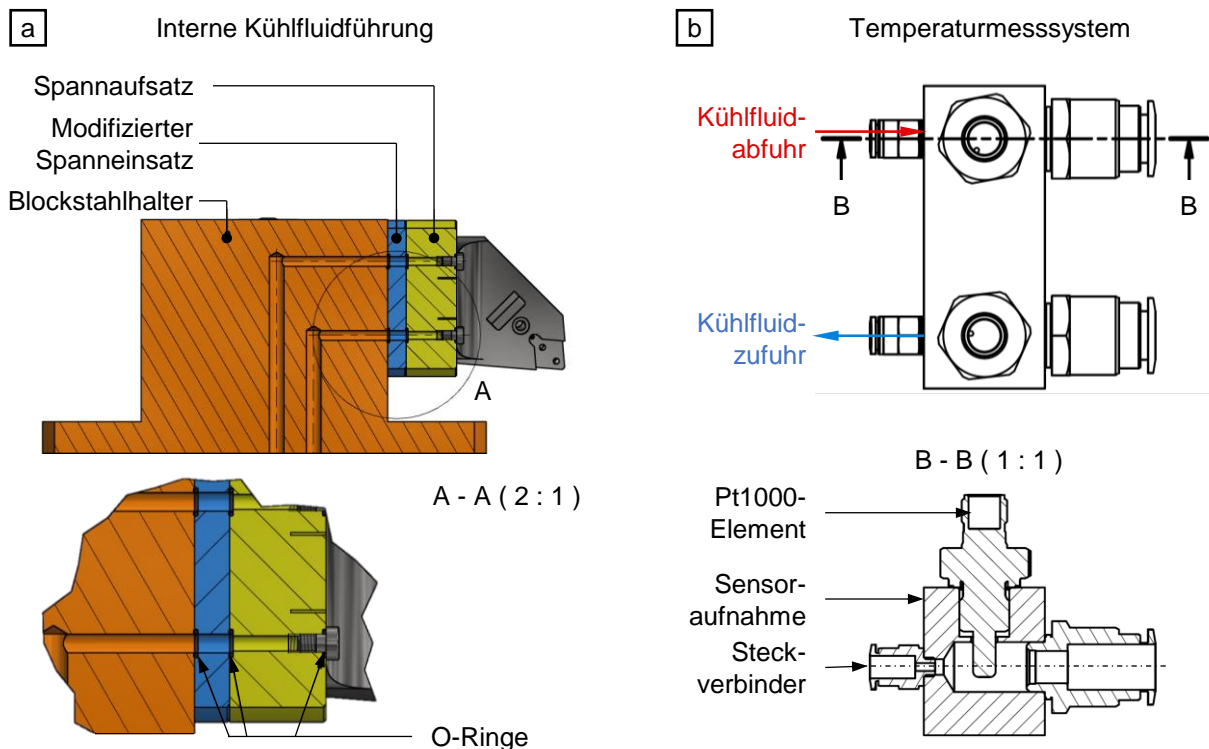


Bild 3-25: Komponenten des innengekühlten Werkzeugsystems am Blockstahlhalter; a) Werkzeughalter und Kühlleitungen; b) Temperaturmesssystem

Die Aufnahme der eingangs- und ausgangsseitigen Temperaturen des Kühlfluids T_{ein} und T_{aus} erfolgt durch ein Temperaturmesssystem, welche an unterschiedlichen Positionen innerhalb der Werkzeugmaschine integriert werden kann, Bild 3-25b. Die Ermittlung der jeweiligen Kühlfluidtemperaturen T_F erfolgt in Echtzeit unter Verwendung von Pt1000-Elementen des Typs TM5105, Fa. IFM ELECTRONIC GMBH, Essen.

3.3.4 C4 - Entwicklung der Werkzeugaufnahme mit integrierter Messtechnik und Hydraulik

Die Werkzeugaufnahme unterliegt keiner Modifikation durch den Einsatz des innengekühlten Gesamtsystems mit externer Kühlfluidführung. Somit ist es möglich standardisierte Werkzeugaufnahmen zu nutzen. Für den Einsatz der Capto®-Schnittstelle erfolgte, wie in AP C3 beschrieben, eine Modifikation des Spanneinsatzes, welcher die Funktion der Werkzeugaufnahme im Blockstahlhalter übernimmt, Bild 3-26. Hierbei war es notwendig, ein Dichtkonzept auf Basis von O-Ringen auszulegen. Auf Grund der ermittelten Druckverluste Δp in AP C2 und zur Sicherstellung einer hohen Wiederholgenauigkeit bei der Positionierung des Werkzeughalters war hierbei eine enge Tolerierung notwendig. Das zulässige Spaltmaß der Dichtfläche zwischen Werkzeughalter und modifiziertem Spannaufsatz beträgt $g_{zul} = 0,1 \text{ mm}$. Somit ist durch Applikation von O-Ringen mit einer Härte von $ShA = 90$ ein Druckverlust von bis zu $\Delta p = 70 \text{ bar}$ möglich. Darüber hinaus wurden zusätzliche Gewinde zur Befestigung des Spannaufsatzes eingebracht. Die Nutzung von links- und rechtsschneidenden Werkzeughaltern wird ferner durch symmetrisch eingebrachte Kühlfluidbohrungen ermöglicht.

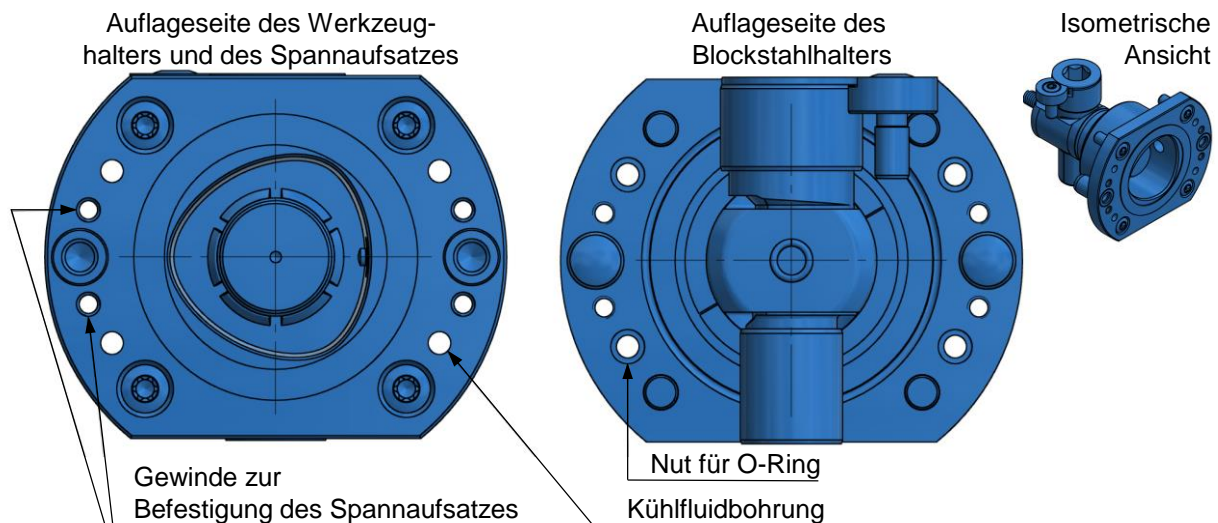


Bild 3-26: Modifizierter Spanneinsatz zur Aufnahme von Capto®-Werkzeughaltern

3.3.5 C5 - Fertigen des Werkzeughalters und der -aufnahme

Die Fertigung der mechanischen Komponenten der geschlossenen Innenkühlung erfolgte durch TESCH. Grundlage hierfür bildet die technische Dokumentation respektive die Einzelteilzeichnungen, welche als Ergebnis 4 in AP B2, AP C1 und AP C3 erzeugt wurden.

3.4 Arbeitspaket D - Maschinenintegration des Kühlkreislaufs

3.4.1 D1 - Auslegung der Hydraulikkomponenten

Neben der geplanten Umsetzung und nahtlosen Integration des innengekühlten Werkzeugsystems in eine Werkzeugmaschine von EMAG, wurde ein am IWF bestehender Versuchstand eingesetzt. Es erfolgte hierbei ein Retrofit unter Verwendung der in AP C2 erzeugten CFD-Ergebnisse sowie analytischer Berechnungen für reibungsbehaftete Rohrwände. Im Ergebnis wird die Förderung des eingesetzten Wasser-Glykol-Gemisches unter Verwendung einer Membranpumpe des Typs MC 8, Fa. ZUWA-ZUMPE GMBH, Laufen, realisiert. Die definierten Einsatzempfehlungen und Leistungsbedarfe werden somit ermöglicht und konnten nach

Inbetriebnahme erfolgreich validiert werden. Die Temperierung des Kühlfluids erfolgt durch einen Umlaufkühler des Typs KK 10, Fa. LABOR- UND REINRAUMTECHNIK ARNSDORF GMBH, Arnsdorf. Mit Hilfe eines zusätzlichen Wärmetauschers sind somit Kühlfluidtemperaturen zwischen $T_{\text{ein}} = -10$ bis 40 °C anwendbar.

Das abschließende Ziel der Wiederinbetriebnahme des Versuchsstands am IWF ist es, das Einsatzverhalten des innengekühlten Werkzeugsystems im Hinblick auf technische Dichtigkeit, mechanischer Belastbarkeit und Kühleffizienz respektive Werkzeugstandvermögen zu bewerten. Das innengekühlte Werkzeugsystem wurde seitens EMAG für die Vertikaldrehmaschine des Typs VLC 200 GT, Fa. EMAG MASCHINENFABRIK GMBH, Salach bis zum Ende des Forschungsvorhabens als Funktionsmuster realisiert und erfolgreich in Betrieb genommen. Hierbei erfolgt die aktive Kühlung des Werkzeugsystems zum aktuellen Stand noch über einen hausinternen Kreislauf.

3.4.2 D2 - Entwicklung eines Hydraulik- und Elektroplans

Sowohl Hydraulik- und Elektroplan des überarbeiteten IWF-Versuchsstands sind in Bild 3-27 dargestellt. Die Steuerung und Regelung des innengekühlten Werkzeugsystems erfolgt teilautomatisiert unter Verwendung einer eigens entwickelten Benutzeroberfläche über die Automatisierungssoftware TwinCAT 3.1, Fa. BECKHOFF AUTOMATION GMBH & Co. KG, Verl. Die entsprechenden Ein- und Ausgabesignale werden mit Hilfe von Busklemmen für die jeweiligen Sensoren und den Frequenzumrichter der Membranpumpe aufbereitet.

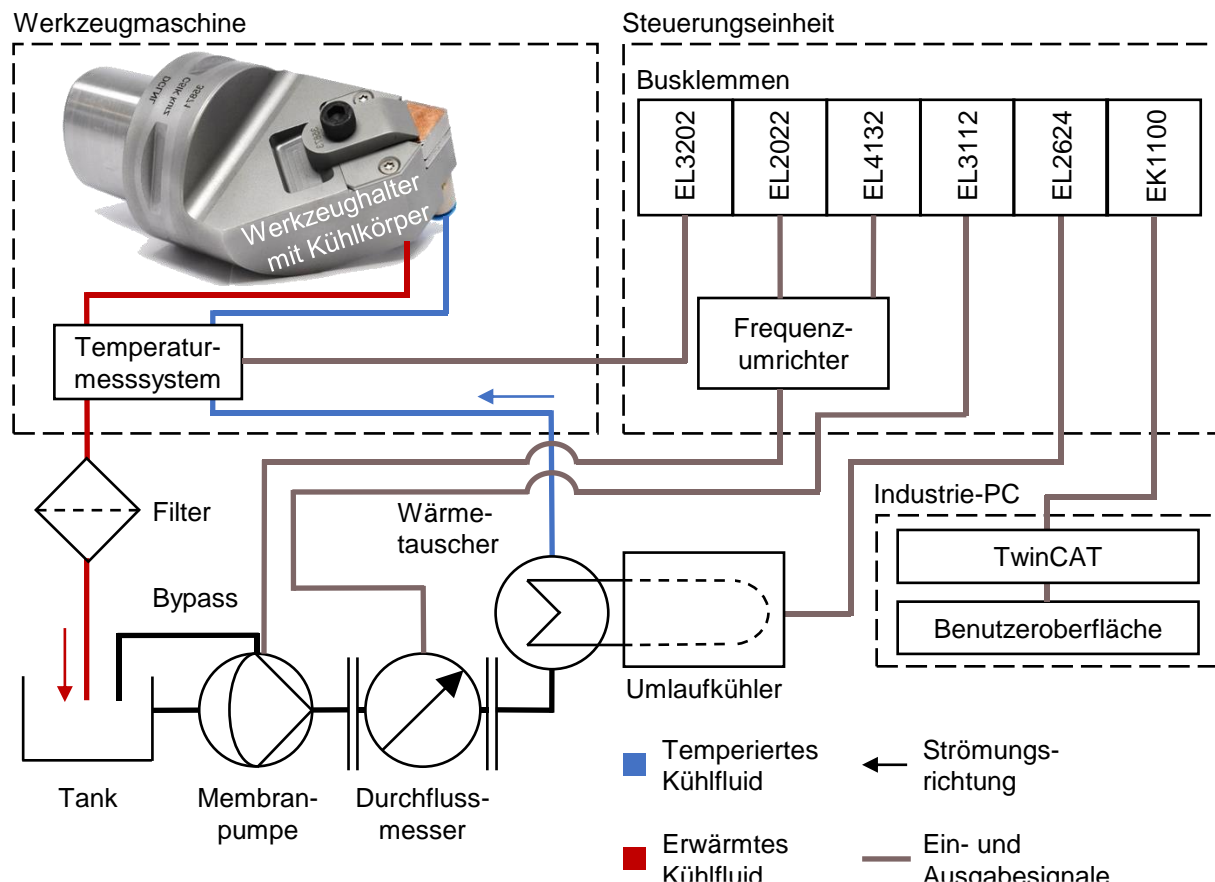


Bild 3-27: Hydraulik- und Elektroplan des überarbeiteten IWF-Versuchsstands

3.4.3 D3 - Anpassung der Werkzeugmaschine und Integration der Hydraulikkomponenten

Der IWF-Versuchsstand ist gegenüber der von EMAG geplanten Integration des innengekühlten Werkzeugsystems vorwiegend als mobile Einheit ausgelegt und somit an unterschiedlichen Drehmaschinen einsetzbar. Für die im Forschungsvorhaben durchzuführenden Zerspanuntersuchungen erfolgte jedoch eine Teilintegration von Sensorkabeln und Kühlfluidschläuchen innerhalb der Schrägbettdrehmaschine TNX 65, Fa. INDEX-Werke GmbH & Co. KG, Esslingen. Eine Gesamtübersicht des innengekühlten IWF-Versuchsstands ist in Bild 3-28 ersichtlich.

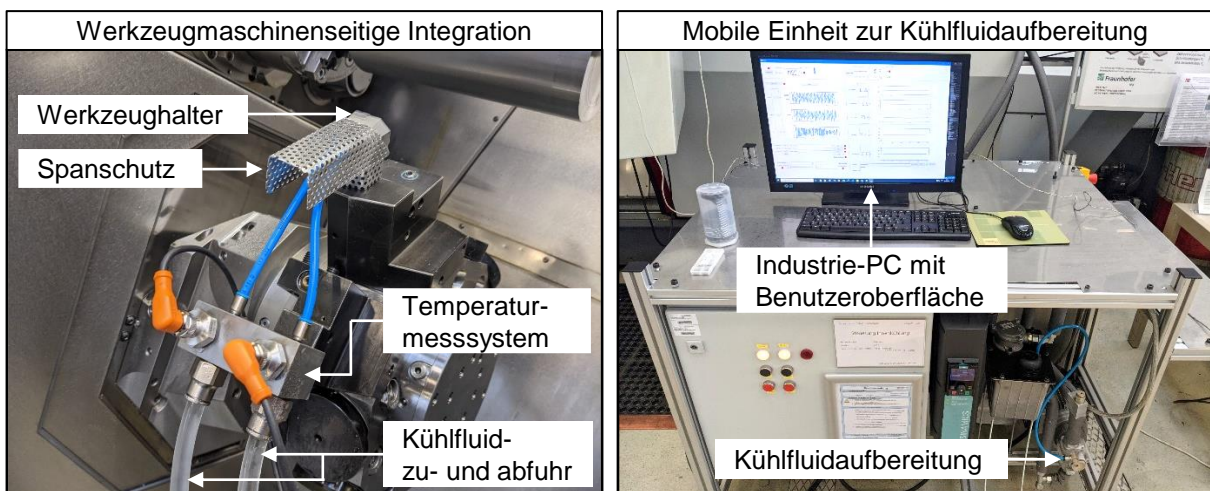


Bild 3-28: Integration des innengekühlten Werkzeugsystems am IWF

Der hydraulische Aufbau des entwickelten EMAG-Funktionsmusters entspricht mit Ausnahme des Kühlaggregats dem IWF-Versuchsstand. Hierbei wurde auf Grund der hausinternen Kühlung gleichermaßen eine externe Kühlfluidzu- und -abfuhr als temporäre Lösung realisiert. Als Schnittstelle zum Werkzeugrevolver wird sowohl eine Werkzeugaufnahme des Typs VDI 50 nach DIN ISO 10889-1 [DIN10889-1] als auch ein Capto® C5-Adapter eingesetzt.

3.4.4 D4 - Auslegung und Integration der Messtechnik zur Bestimmung von Temperatur und Kraftwerten

Die Auswahl der Temperatursensoren in AP C3, welche der messtechnischen Erfassung der Kühlfluidtemperaturen an Einlass T_{ein} und Auslass T_{aus} dient, erfolgte auf Grundlage der in AP C2 erzielten Ergebnisse. Somit ist es möglich während des Drehprozesses eine Temperaturdifferenz ΔT des Kühlfluids zu ermitteln und als Regelgröße für den Volumenstrom \dot{V} im innengekühlten Werkzeugsystem einzusetzen. Zur Beurteilung des Verhaltens der Kühlfluidtemperatur T_F wurden mit der am IWF vorhandenen Innenkühlung tentativ Langzeituntersuchungen durchgeführt, Bild 3-29. Es ist für den exemplarisch dargestellten Versuch feststellbar, dass ein stationärer Zustand der Kühlfluidtemperatur T_F bei einer Schnittzeit von $t_s \approx 20$ s erreicht wird. Die dabei entstehende Temperaturdifferenz ΔT liegt hierbei im Bereich der numerisch ermittelten Werte.

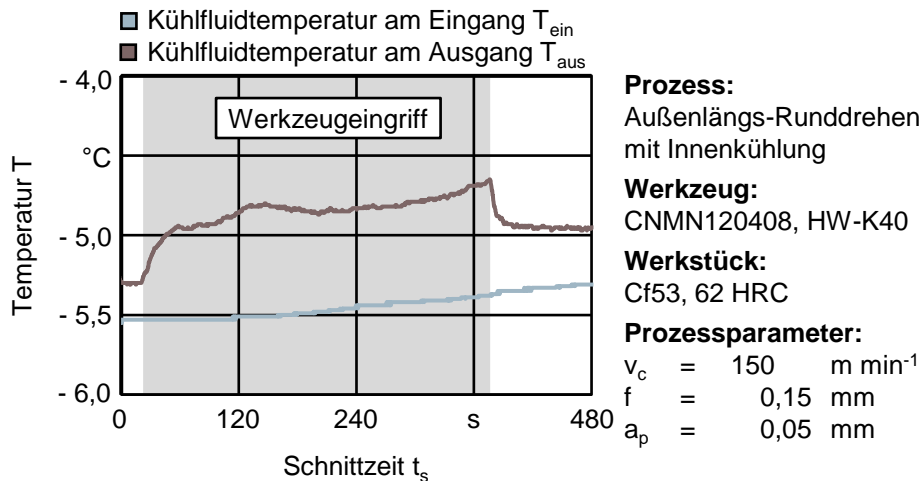


Bild 3-29: Verhalten der eingangs- und ausgangsseitigen Temperatur T_{ein} und T_{aus} beim Außenlängs-Runddrehen mit Innenkühlung

Darüber hinaus ist während des Werkzeugeingriffs mit $t_s > 120 \text{ s}$ eine konstante Erhöhung der Fluidtemperatur am Eingang T_{ein} feststellbar. Ursächlich hierfür ist der kontinuierliche Wärmeeintrag in das Kühlfluid durch das Werkzeug und die daraus resultierende sukzessive Erwärmung der gesamten Innenkühlung. Dieser Effekt wird zusätzlich durch die Isolierung des innengekühlten Werkzeugsystems sowie den fortschreitenden Werkzeugverschleiß an Span- und Freifläche verstärkt. Diese Limitierung ist auf den am IWF eingesetzten Wärmetauscher und dessen fehlende Leistungsfähigkeit zurückzuführen. Durch die Auslegung eines größeren Tankvolumens gegenüber der Innenkühlung am IWF sowie durch geringere Werkzeugeingriffszeiten gegenüber den durchgeführten Langzeituntersuchungen ist im industriellen Einsatz mit keiner Erhöhung der Temperatur am Eingang T_{ein} zu rechnen.

Im Hinblick auf das zu entwickelnde Kraftmesssystem wurde durch das Konsortium eine Lösung angestrebt, welche geringere Anschaffungskosten im Vergleich zu piezoelektrischen Systemen aufweist, **Bild 3-30a**. Somit erfolgte dessen Systementwicklung unter Verwendung einer wheatstoneschen Messbrücke mit Dehnmessungstreifen (DMS), **Bild 3-30b**.

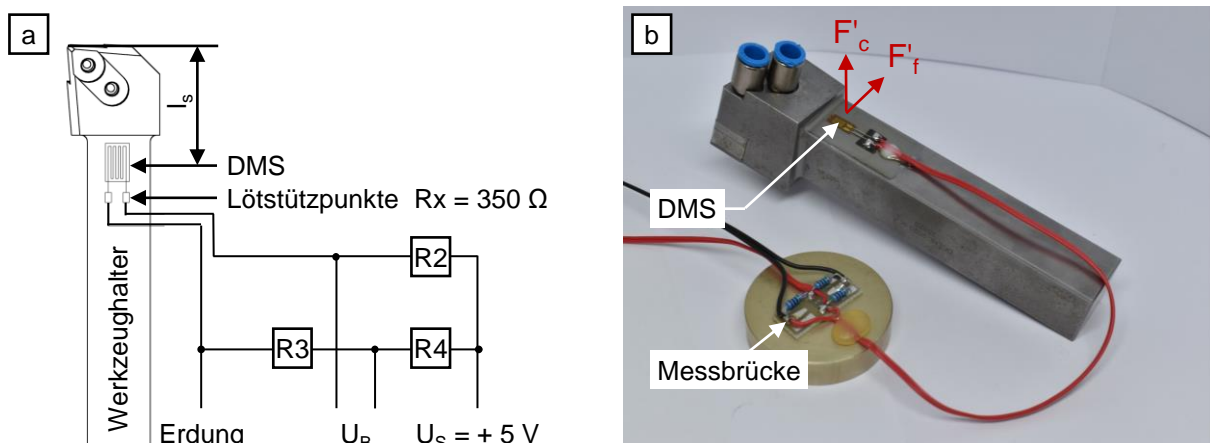


Bild 3-30: Werkzeughalter mit wheatstonescher Messbrücke; a) Schaltbild; b) Funktionsmuster

Zur Feststellung der Eignung eines solchen Kraftmesssystems wurde eine Viertelbrückenschaltung zur Aufnahme der Schnittkraft F_c auf den innengekühlten Werkzeughalter appliziert. In Theorie erfolgt die Ermittlung dieser Kraft auf Grundlage der zu messenden Brücken-

spannung U_B , der Speisespannung U_s sowie des hookeschen Gesetzes. Der im Drehprozess aufzunehmende Lastfall für die Schnittkraft F_c entspricht einer einachsigen Biegung und kann mit Hilfe von Formel 3-2 berechnet werden.

$$F_C = \frac{4}{k_{DMS}} \cdot \frac{U_B}{U_s} \cdot \frac{E_M \cdot a_W^3}{6 \cdot I_s} \quad (3-2)$$

Unter Einsatz variabler Vorschübe f und durch die Bewertung der gemessenen Brückenspannung U_B ist jedoch ersichtlich, dass mit der Messbrücke keine eindeutige Separation der Zerspanspannkraftkomponenten F_x vorgenommen werden kann. Ursächlich hierfür ist die Superposition von Schnittkraft F_c und Vorschubkraft F_f , welche aus der Vorschubbewegung während des Außenlängs-Runddrehens resultiert. Ferner wurde festgestellt, dass eine nicht vernachlässigbare thermische Abhängigkeit des DMS vorliegt, welche durch einen Drift der Brückenspannung U_B ab $t_s = 3$ s identifizierbar ist, Bild 3-31. Eine Temperaturkompensation ist somit notwendig, um mehrere aufeinanderfolgende Werkzeugeingriffe respektive Kraftsignale messtechnisch abbilden zu können.

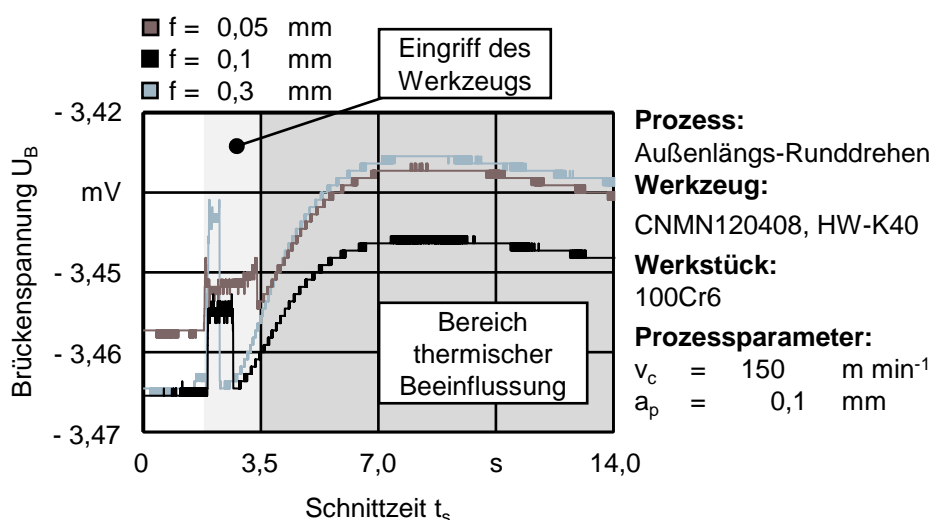


Bild 3-31: DMS-Verhalten während des Außenlängs-Runddrehens

Im Ergebnis konnte innerhalb der Versuchsreihen zur DMS-Kraftmessung festgestellt werden, dass die Kompensation thermischer Effekte und die Aufnahme von Kraftsignalen in einer Ebene nur über einen komplexeren Messaufbau realisiert werden kann. Daher wurde das Kraftmesssystem auf Grund der fehlenden industriellen Praktikabilität im Forschungsvorhaben nicht weiterverfolgt. Die Ermittlung der Zerspanspannkraftkomponenten F_x für das innengekühlte Werkzeugsystem erfolgte innerhalb der technologischen Untersuchungen somit durch ein 3-Komponenten-Dynamometer des Typs 9121, Fa. KISTLER INSTRUMENTE GMBH, Winterthur, Schweiz.

3.4.5 D5 - Steuerungsintegration des Werkzeugsystems

Die Steuerung des IWF-Versuchsstands erfolgt, wie in AP D2 und D3 dargelegt, über einen Industrie-PC. Die entwickelte Bedienoberfläche ermöglicht die Überwachung und Aufnahme von

- der Kühlfluidtemperatur an Einlass T_{ein} und Auslass T_{aus} ,
- den Zerspanspannkraftkomponenten F_x mit Driftkompensation,
- der Werkzeugtemperatur T_{WZ} unter Verwendung eines Thermoelements

und dient zusätzlich der Analyse des innengekühlten Werkzeugsystems. Darüber hinaus ist ein Regelkreis realisiert worden, welcher die Pumpendrehzahl n_P auf Basis des messtechnisch ermittelten Volumenstroms \dot{V} in Echtzeit variiert. Der Betrieb des EMAG-Funktionsmusters erfolgte bis zum Ende des Forschungsvorhabens manuell. Hierbei wurde die Aufnahme der Kühlfluidtemperaturen T_{ein} und T_{aus} bereits in die CNC-Steuerung integriert.

3.5 Arbeitspaket E - Erprobung und Evaluierung

3.5.1 E1 - Erprobung der Einzelkomponenten/Schnittstellen

Zur Beurteilung des innengekühlten Werkzeugsystems wurde ein Versuchsstand entwickelt, welcher quasi-statische Eingriffsbedingungen in Analogie zum Drehprozess abbilden kann. Im Schwerpunkt soll die Effizienz der Innenkühlung sowie der resultierenden Kühlfluidtemperaturen T unter einem definierten Wärmestrom \dot{Q} untersucht werden. Die Entwicklung des Versuchsstands erfolgte unter Einsatz methodischer Entwicklungsansätze entsprechend AP A2. In Bild 3-32 ist der einsatzfähige Versuchsstand dargestellt. Die Realisierung einer definierten Temperatur T erfolgt durch ein keramisches Heizelement, welches über eine Spitze aus Ti-6Al-4V zur Wärmeübertragung verfügt. Die entwickelte Innenkühlung besteht aus einem hydraulischen Kreislauf basierend auf einer Pumpe, mehreren Druck- und Temperatursensoren, einem additiv gefertigten Kühlkörper aus Kupfer sowie einem Wärmetauscher. Die Steuerung des gesamten Prüfstands erfolgt über eine speziell entwickelte Controllerbox.

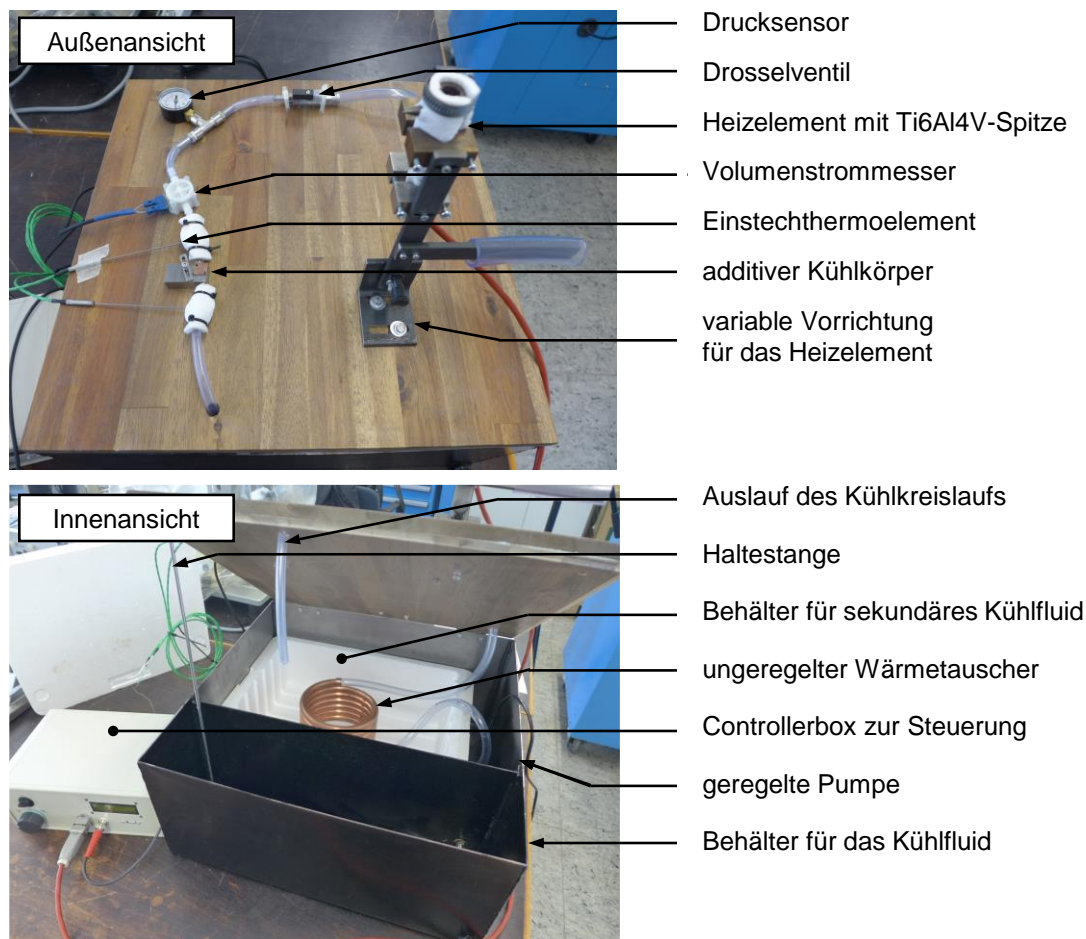


Bild 3-32: Darstellung der hydraulischen Komponenten sowie der Druck- und der Temperatursensoren des Prüfstands

Der Fokus der Untersuchungen lag in der aus AP C2 identifizierten Abhängigkeit der maximalen Werkzeugtemperatur $T_{WZ,max}$ zur WSP-Dicke s . Es wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt, welche den ungekühlten sowie gekühlten Zustand während der Trockenbearbeitung darstellen. Hierbei wurden WSP basierend auf der HW-Spezifikation K40 mit den in AP A1 definierten WSP-Dicken s eingesetzt. Die maximale Temperatur des Heizelements wurde mit $T_{HE} = 500 \text{ °C}$ definiert. Der realisierbare Volumenstrom betrug $\dot{V} = 0,35 \text{ l min}^{-1}$. Die Ermittlung der resultierenden Temperaturen T erfolgte am Ein- und Ausgang des additiven Kühlkörpers durch Nutzung von zwei Einstechthermoelemente. Die Temperatur-Zeit-Verläufe für die jeweiligen WSP-Dicken s sind in Bild 3-33 dargestellt.

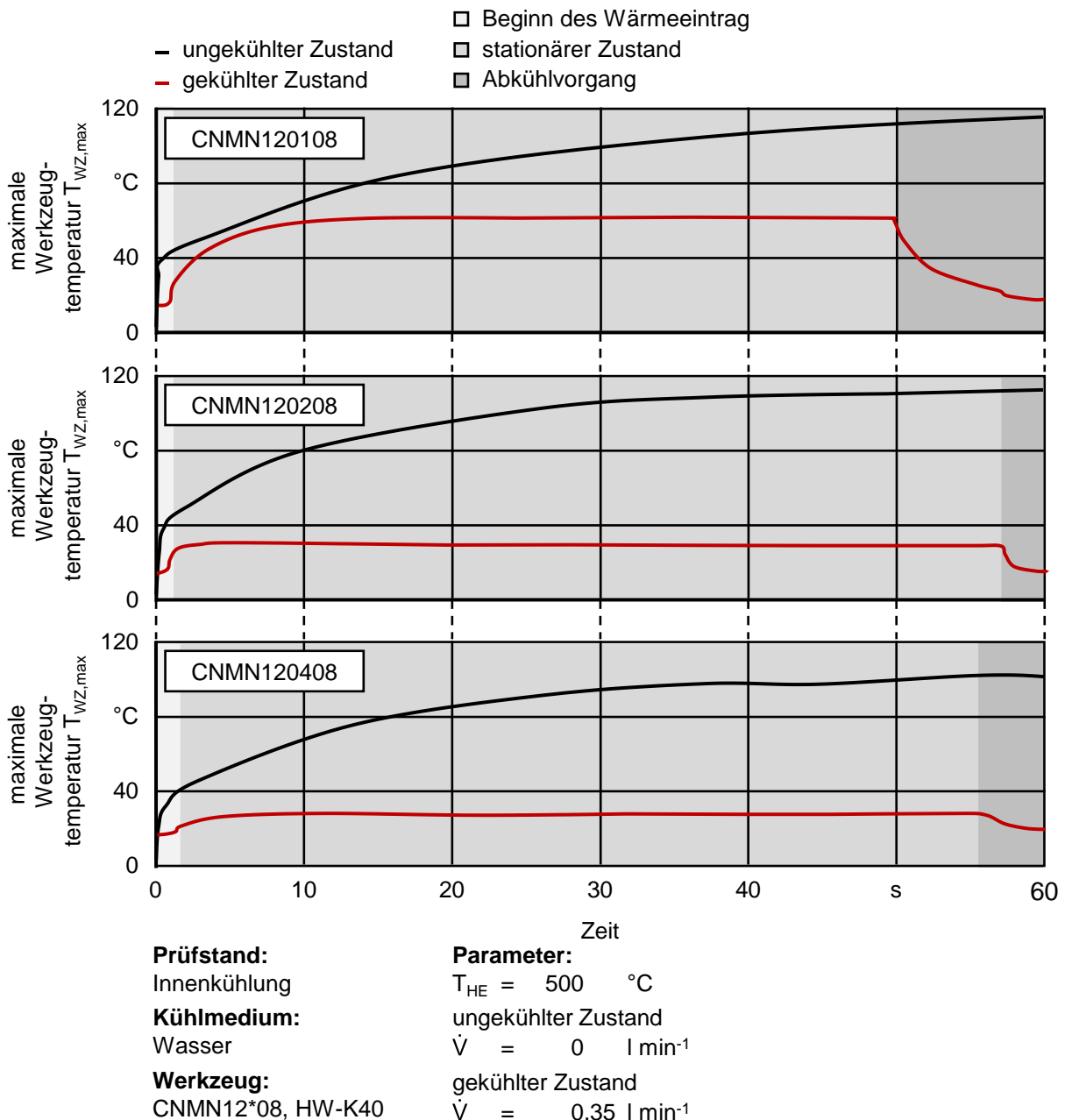


Bild 3-33: Zeitliches Temperaturverhalten von WSP im ungekühlten und gekühlten Zustand

Es konnte aufgezeigt werden, dass die maximale Werkzeugtemperatur $T_{WZ,max}$ durch Einsatz einer Innenkühlung unter stationären Bedingungen effizient reduziert werden kann. Im Vergleich zum ungekühlten Zustand der WSP, ist eine maximale Temperaturdifferenz ΔT von bis

zu 70 % feststellbar. Darüber hinaus bildet sich der stationäre Zustand durch Einsatz der Innenkühlung schneller als im ungekühlten Zustand aus. Dieser ist bei allen WSP-Dicken s nach $t = 15$ s erreicht. Für ungekühlte WSP sind keine vollständig stationären Bedingungen nachweisbar. So erwärmen sich die WSP auch noch nach dem Abbruchkriterium von $t = 60$ s weiter und es konnte kein Gleichgewichtszustand erreicht werden. Die Untersuchung eines längeren Zeitrahmens ist jedoch nur von geringer industrieller Relevanz und wurde daher nicht betrachtet. Weiterhin war es nicht möglich, den Effekt einer verbesserten Kühlwirkung durch Einsatz geringerer WSP-Dicken s nachzuweisen. Ursächlich hierfür sind die hohen Fertigungstoleranzen der erodierten Bohrungen, welche die Aufnahme von Thermoelementen ermöglichen, in Verbindung mit dem lokal variierenden Temperaturfeld innerhalb der WSP.

3.5.2 E2 - Zerspanungsuntersuchung im Labormaßstab

Nach Finalisierung des IWF-Versuchsstands wurden initiale Untersuchungen im Hinblick auf das Systemverhalten der Innenkühlung durchgeführt. Zu diesem Zweck erfolgte die Zerspanung von C45E. Die hierbei auftretenden Zerspankraftkomponenten F_x begünstigen einen geringeren Verschleiß der eingesetzten HW-K40-Werkzeuge im Vergleich zu den definierten Werkstoffen. Dies ermöglichte eine Erhöhung des Versuchsumfangs.

In Bild 3-34 ist ersichtlich, dass die Schnittgeschwindigkeit v_c einen relevanten Einfluss auf die Werkzeugtemperatur T_{WZ} ausübt. Ursächlich hierfür ist die Reibung auf der Spanfläche, welche mit steigender Schnittgeschwindigkeit v_c zunimmt. Im Ergebnis erfolgt ein höherer Wärmeintrag in das Werkzeug. Dieser Effekt kann jedoch durch Erhöhung des Volumenstroms \dot{V} reduziert werden. So ist für Schnittgeschwindigkeiten bis einschließlich $v_c = 150$ m min⁻¹ eine Reduzierung der Werkzeugtemperatur T_{WZ} um ca. 10 % durch Erhöhung des Volumenstroms von $\dot{V} = 0,5$ l min⁻¹ auf $\dot{V} = 1,0$ l min⁻¹ feststellbar. Unter Einsatz einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 300$ m min⁻¹ kann unter den gleichen Randbedingungen eine Reduzierung der Werkzeugtemperatur T_{WZ} um 20 % festgestellt werden. Der Effekt einer Temperaturreduzierung strebt dabei, analog zu den ermittelten CFD-Ergebnissen in AP C2, mit steigendem Volumenstrom \dot{V} einen Grenzwert an.

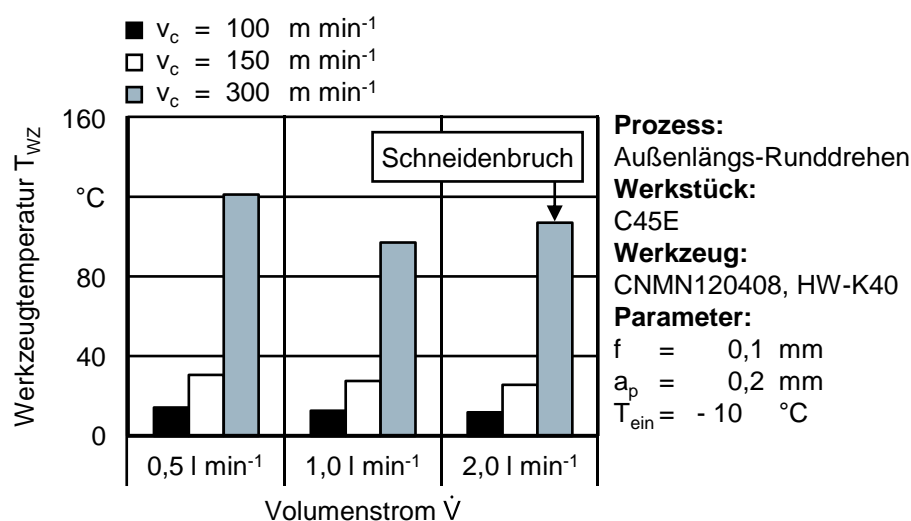


Bild 3-34: Werkzeugtemperatur T_{WZ} unter Einsatz variierender Schnittgeschwindigkeiten v_c in Abhängigkeit des Volumenstroms \dot{V} für C45E

Es konnte weiterhin erfolgreich validiert werden, dass die Variation der WSP-Dicke s die Werkzeugtemperatur T_{WZ} beeinflusst, Bild 3-35. Es ist feststellbar, dass dessen Einfluss gegenüber dem Volumenstrom \dot{V} höher ist. Grund hierfür ist der in den CFD-Simulationen definierte Wärmeübergang, welcher maßgeblich durch Faktoren, wie Formtoleranz, Oberflächengüte und Anpresskraft des Spannfingers beeinflusst wird und den abgeführten Wärmestrom \dot{Q} signifikant beeinflussen kann. Es ist eine Reduzierung der Werkzeugtemperatur T_{WZ} um bis zu 40 % durch den Einsatz von WSP mit $s = 1,58$ mm gegenüber $s = 4,76$ mm unter konstantem Volumenstrom \dot{V} erreichbar.

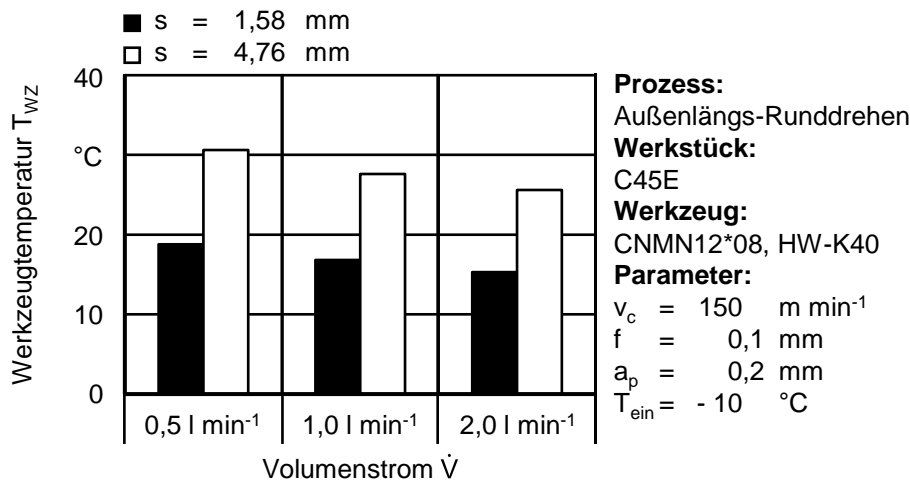


Bild 3-35: Werkzeugtemperatur T_{WZ} unter Einsatz variierender WSP-Dicken s in Abhängigkeit des Volumenstroms \dot{V} für C45E

Darüber hinaus wurde das Verhalten des Kühlfluids durch dessen Temperaturdifferenz an Ein- und Ausgang, welches durch ΔT_F beschrieben wird, untersucht, Bild 3-36. Der Einsatz von WSP mit Dicken von $s < 4,76$ mm resultiert in einer Abnahme der Fluidtemperaturdifferenz ΔT_F . Ferner erhöht sich die Differenz von ΔT_F zwischen den Schnittgeschwindigkeiten $v_c = 150$ m min⁻¹ und $v_c = 200$ m min⁻¹ durch Abnahme der WSP-Dicke s . Dies lässt auf einen effizienteren Wärmetransport schließen. Grund hierfür ist die geringere Wärmekapazität c dünnerer WSP, welche dazu führt, dass eine schnellere Erwärmung stattfindet und somit die Werkzeugtemperatur T_{WZ} bei konstanten Prozessparametern schneller abgeführt wird.

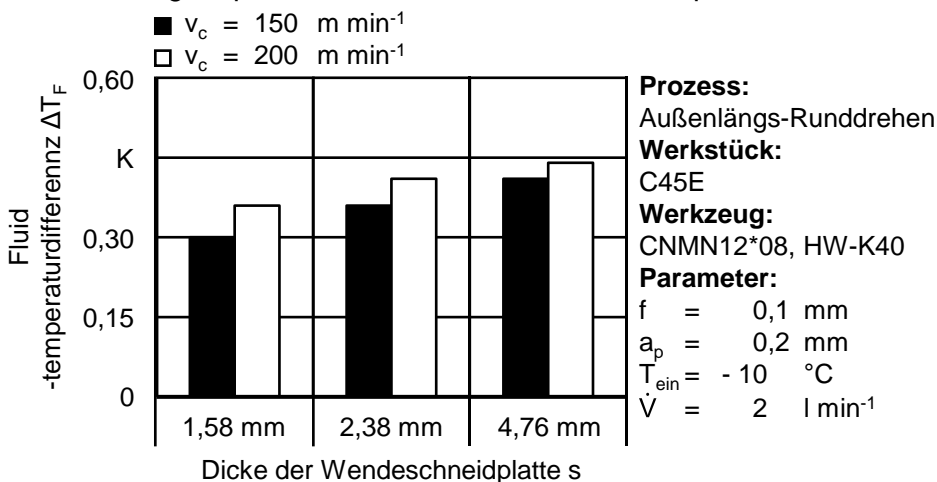


Bild 3-36: Fluidtemperaturdifferenz ΔT_F unter Einsatz variierender Schnittgeschwindigkeiten v_c in Abhängigkeit der WSP-Dicke s für C45E

Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass Kühlfluidtemperaturen von $T_{\text{ein}} < 0 \text{ °C}$ zu Eisbildung und Kondensation am Werkzeughalter sowie den Kühlfluidschläuchen führen. Seitens EMAG wurde daher eine minimale Kühlfluidtemperatur von $T_{\text{ein}} = 5 \text{ °C}$ für die weiteren Zerspanuntersuchungen empfohlen.

Die Beurteilung des Prozessverhaltens innengekühlter Werkzeuge erfolgte unter Einsatz des Außen-Längs-Runddrehens der Werkstoffe 100Cr6 sowie Cf53, welche in AP A1 definiert wurden. Die Bewertung der Leistungsfähigkeit erfolgte anhand von werkzeugseitigen Parametern, wie z. B. der Verschleißmarkenbreite VB, den Zerspankraftkomponenten F_x und der Kolk-tiefe KT auf der Spanfläche. Die Analyse des Prozessverhaltens erfolgte auf der in AP D3 dargestellten Schrägbettdrehmaschine. Als Abbruchkriterium wurde werkzeugseitig eine maximale Verschleißmarkenbreite von $VB_{\text{max}} = 0,2 \text{ mm}$ festgelegt. Das innengekühlte Werkzeugsystem wurde unter Verwendung der in AP C2 definierten Einsatzempfehlungen eingesetzt. Jedoch wurde zusätzlich die eingangsseitige Fluidtemperatur T_{ein} variiert, um den Effekt der Kühleffizienz zu beurteilen. In Bild 3-37 sind die Ergebnisse der Zerspanuntersuchungen für die Weichbearbeitung von 100Cr6 dargestellt. Wie zu erkennen ist, führt der Einsatz beider Innenkühlstrategien gegenüber der Trockenbearbeitung bei einem konstanten Eingriffsweg L_f zu einer Reduzierung der Verschleißmarkenbreite VB. Es ist davon auszugehen, dass die temperaturbedingte Abnahme der Schneidstoffhärte durch die Innenkühlung verzögert und die Abrasionsbeständigkeit somit begünstigt wird. Darüber hinaus wird deutlich, dass die Reduzierung der Fluidtemperatur am Eingang T_{ein} in einer Verbesserung des Standvermögens resultiert. So ermöglichte der Einsatz von $T_{\text{ein}} = 5 \text{ °C}$ gegenüber $T_{\text{ein}} = 20 \text{ °C}$ eine Reduzierung der Verschleißmarkenbreite VB von 10 %.

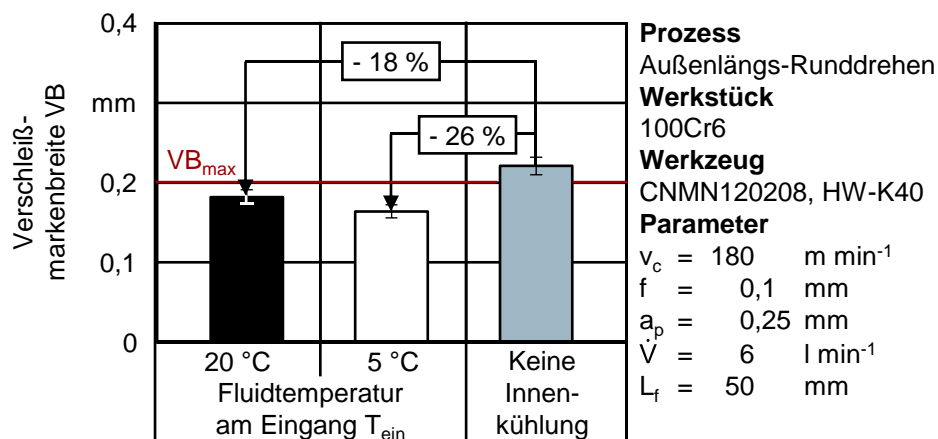


Bild 3-37: Verschleißmarkenbreite VB unter Einsatz variabler Kühlstrategien bei konstantem Eingriffsweg L_f für 100Cr6

Das Verschleißverhalten der unterschiedlichen Kühlstrategien korreliert ferner mit den resultierenden Zerspankraftkomponenten F_x , Bild 3-38. Es ist erkennbar, dass die Anwendung einer Innenkühlung mit $T_{\text{ein}} = 20 \text{ °C}$ vergleichbare Zerspankraftkomponenten F_x wie die Trockenbearbeitung aufweist. Jedoch ist für $T_{\text{ein}} = 5 \text{ °C}$ ersichtlich, dass insbesondere eine Reduzierung der Vorschubkraft F_f um 30 % und der Schnittkraft F_c um 18 % vorliegen. Es ist anzunehmen, dass eine thermische Kontraktion, welche aus der Fluidtemperatur T_{ein} resultiert, diesen Sachverhalt der Reduzierung der Zerspankraftkomponenten F_x begünstigt. Nachfolgende Messungen ergaben ein Schrumpfen des Werkzeughalters im Bereich von $l_K = 7 \text{ bis } 8 \text{ }\mu\text{m}$. Dies muss insbesondere für Drehaufgaben mit engen Toleranzvorgaben, wie z. B. während des Schlichtens berücksichtigt werden.

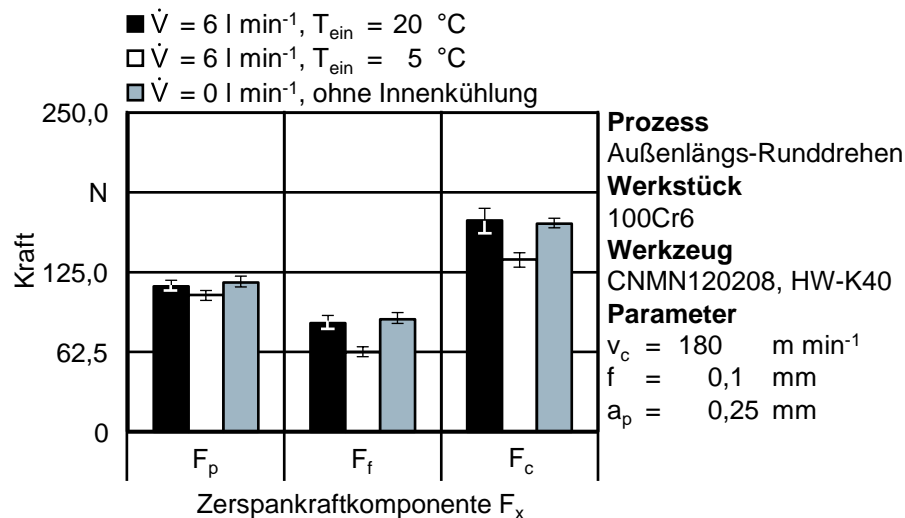


Bild 3-38: Zerspankraftkomponenten F_x unter Einsatz variabler Kühlstrategien für 100Cr6

Ein wichtiger Indikator für die thermische Werkzeugbelastung ist der diffusionsbedingte Kolkverschleiß im Kontaktbereich zwischen Span und Spanfläche. Optische Messungen ergaben hierbei eine Reduzierung der maximalen Kolkentiefe KT_{max} zwischen 35 % und 41 %, Bild 3-39. Analog zur Verschleißmarkenbreite VB ermöglicht der Einsatz von $T_{\text{ein}} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ die höchste Diffusionsbeständigkeit.

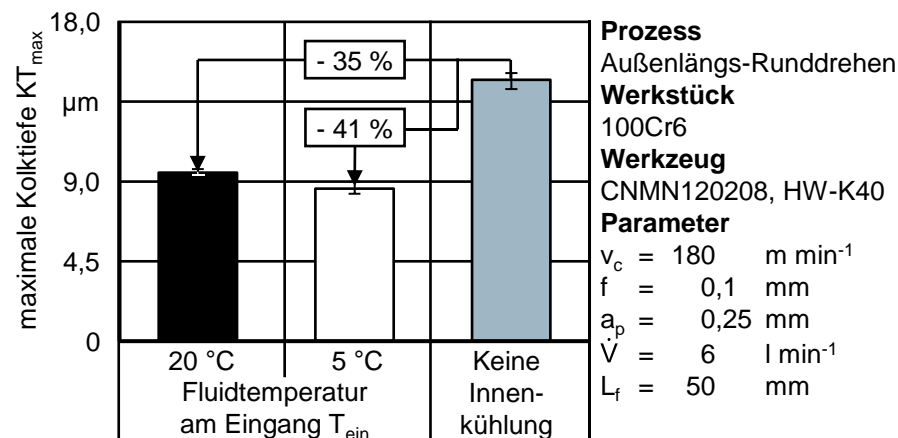


Bild 3-39: Maximale Kolkentiefe KT_{max} unter Einsatz variabler Kühlstrategien für 100Cr6

Die Bearbeitung des gehärteten Stahls Cf53 stellt gegenüber 100Cr6 höhere Anforderungen an die thermische und die mechanische Stabilität der Werkzeuge. Das begrenzte Standvermögen der WSP aus HW-K40 ermöglichten hierbei keine zuverlässige Aussagekraft im Hinblick auf die Leistungsfähigkeit des innengekühlten Werkzeugsystems für die Hartbearbeitung. Aus diesem Grund wurden WSP mit Schneideinsätzen aus kubischem Bornitrid (CBN) des Typs BN600, Fa. SUMITOMO CORP, Japan eingesetzt. Die Verschleißmarkenbreite VB zeigt nur eine geringfügige Verbesserung bei konstantem Eingriffsweg L_f auf. So kann durch Einsatz einer Innenkühlung mit $T_{\text{ein}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ der freilächenseitige Verschleiß durchschnittlich nur um 5 % gegenüber der Trockenbearbeitung reduziert werden, Bild 3-40. Wird die Fluidtemperatur auf $T_{\text{ein}} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ gesenkt, ist ein gegensätzlicher Trend zu beobachten. Die Schneidkanten neigen zu spontanen Ausbrüchen und Versagen vor dem Erreichen des definierten Eingriffswegs von $L_f = 250 \text{ mm}$. Es ist zu vermuten, dass eine Rissinduktion durch Thermoschock bei geringen Fluidtemperaturen T_F verursacht wird. Dieser Sachverhalt konnte bis zum Ende des

Forschungsvorhabens nicht abschließend geklärt werden und bedingt weiterführende Untersuchungen.

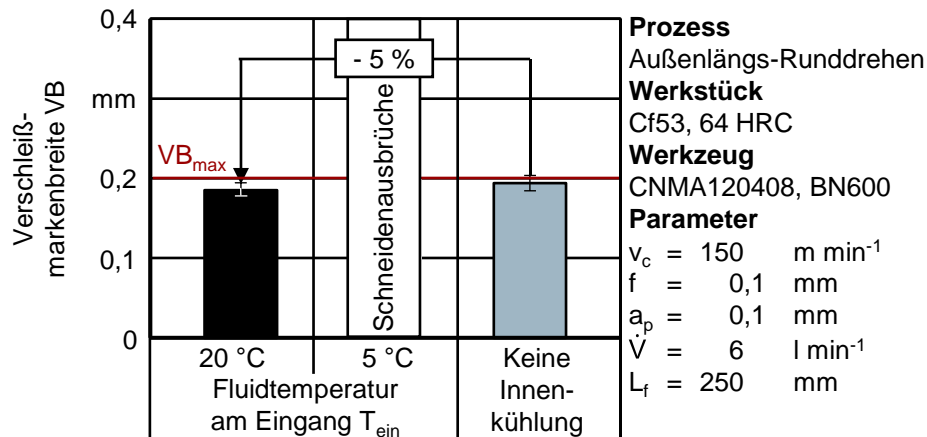


Bild 3-40: Verschleißmarkenbreite VB unter Einsatz variabler Kühlstrategien bei konstantem Eingriffsweg L_f für Cf53, 64 HRC

Auch Messungen der Zerspankraftkomponenten F_x zeigen auf, dass keine mechanische Überlastung der innengekühlten WSP mit $T_{\text{ein}} = 5 \text{ °C}$ vorliegt, Bild 3-41. Trotz einer größeren Streuung von Vorschub- F_f und Schnittkraft F_c ist gegenüber der Innenkühlung mit $T_{\text{ein}} = 20 \text{ °C}$ und der Trockenbearbeitung keine signifikante Abweichung festzustellen. Jedoch ist ersichtlich, dass die Passivkraft F_p gegenüber dem ungekühlten Prozess um 42 % reduziert ist. Dieser Effekt ist auf die thermische Kontraktion des Werkzeughalters zurückzuführen. Eine Kompensation ist somit insbesondere für geringe Schnitttiefen a_p notwendig. Dahingegen führt eine eingangsseitige Fluidtemperatur von $T_{\text{ein}} = 20 \text{ °C}$ zu einer reduzierten Streuung der Zerspankraftkomponenten F_x und einer geringeren thermischen Expansion des Werkzeughalters. Im Resultat ist von einer erhöhten Prozesssicherheit durch Einhaltung definierter Form- und Lagetoleranzen seriengefertigter Bauteile bei gleichbleibendem Standvermögen auszugehen.

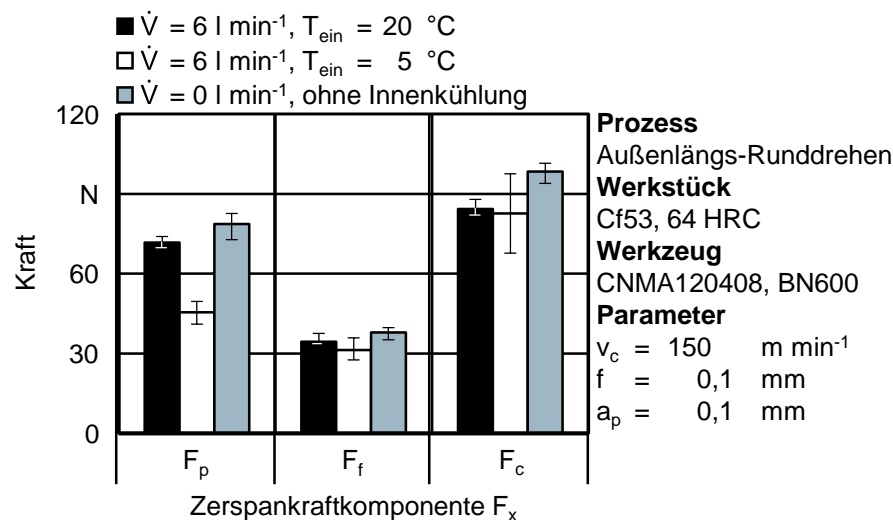


Bild 3-41: Zerspankraftkomponenten F_x unter Einsatz variabler Kühlstrategien für Cf53, 64 HRC

Der Einsatz des innengekühlten Werkzeugsystems weist auch für $T_{\text{ein}} = 20 \text{ °C}$ einen positiven Effekt auf die Diffusionsbeständigkeit von WSP basierend auf CBN auf, Bild 3-42. So konnte die maximale Kolkentiefe KT_{max} gegenüber der Trockenbearbeitung um 10 % reduziert werden.

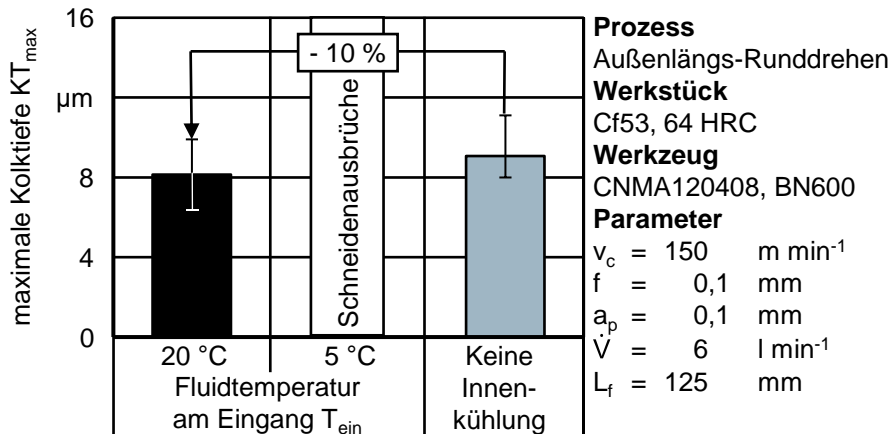


Bild 3-42: Maximale Kolkthiefe KT_{\max} unter Einsatz variabler Kühlstrategien für Cf53, 64 HRC

3.5.3 E3 - Bewertung der Leistungsfähigkeit/des Risikos

Zur Identifikation quali- und quantitativer Risiken im Hinblick auf das innengekühlte Werkzeugsystem, wurde die Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA) verwendet. Für die Sicherstellung eines fehlerfreien Entwicklungsprozesses wurde eine Prozess-FMEA erstellt. Die Beurteilung der Fertigung sowie der Maschinen- und der Bediener-sicherheit erfolgte durch die Erzeugung einer Produkt-FMEA. Potenziell auftretende Fehler sowie deren Ursachen und Folgen wurden mit Hilfe eines Bewertungssystems klassifiziert. Hierbei wurden drei Kriterien mit einem Bewertungsschlüssel von 1 bis 10 definiert. Diese Kriterien umfassen neben der Bedeutung für den Kunden sowohl die Auftretens- als auch die Entdeckungswahrscheinlichkeit. Eine ausführliche Darstellung der definierten Kriterien ist in [Anlage A-1](#) dargestellt. Durch Multiplikation der dargestellten Kriterien liegt eine Risiko-Prioritätszahl (RPZ) vor, welche Werte zwischen $RPZ = 1$ bis 1.000 annehmen kann. Ein Handlungsbedarf zur Fehlervermeidung besteht ab einem Wert von $RPZ = 125$. In [Tabelle 3-10](#) sind exemplarische Fehler der Produkt- und Prozess-FMEA, welche als kritisch einzustufen sind, aufgeführt. Die Produkt- und die Prozess-FMEA können in vollständiger Form der [Anlage A-2](#) bis [Anlage A-6](#) entnommen werden.

Tabelle 3-10: Exemplarische Fehler des innengekühlten
 Werkzeugsystems basierend auf Produkt- und Prozess-FMEA

Möglicher Fehler / Fehlfunktion	Bedeutung	Mögliche Fehlerfolge	Mögliche Fehlerursachen	Derzeitiger Zustand				
				Vermeidungsmaßnahmen	Auftreten	Entdeckungsmaßnahmen	Entdeckung	RPZ
Produkt-FMEA								
Kühlkreislauf								
Keine / unzureichende Kühlung an Wirkstelle	10	Erhöhter Verschleiß, schlechtere Bauteilqualität	Wärmeübergang WSP / Kühlplatte zu gering	CFD-Simulation / Thermische Analyse	6	Sichtprüfung WSP und Werkstück	4	240
Werkzeughalter								
Fixierung unzureichend	8	Schlechtere Bauteilqualität, Maßungenauigkeiten, Unterbrechung Fertigungsprozess	Toleranzen des Polygonschafts fehlerhaft	Toleranzanalyse	4	Sichtprüfung nach Probelauf	4	128
Spannfinger								
Plastische Verformung	10	Unzureichende Fixierung WSP	Festigkeit ungenügend	Statische Simulation	4	Sichtprüfung nach Probelauf	4	160
Prozess-FMEA								
Fertigung des Werkzeughalters								
Kanäle mit zu großem Durchmesser gefertigt	8	Undichtigkeit, keine / unzureichende Weiterleitung des Kühlmittels	Bohrvorgang fehlerhaft	Programmierung überprüfen	2	Vollprüfung	6	96
Fertigung des Spannfingers								
Geometrie fehlerhaft	9	Fixierung der WSP unzureichend	CNC-Programmierung fehlerhaft	Programmierung überprüfen	2	Vollprüfung	4	72
Kleben der Kühlplatte								
Klebmenge zu gering	6	Fixierung unzureichend	Klebeanweisung uneindeutig	Menge definieren	3	Probelauf	6	108

Darüber hinaus ist die Leistungsfähigkeit des geschlossen-innengekühlten Werkzeugsystems auf Grundlage ökologischer als auch ökonomischer Aspekte untersucht und bewertet worden. Für die ökologische Betrachtung wurden die resultierenden CO₂-Emissionen ermittelt, welche aus der Herstellung einer WSP basierend auf HW-K40 und der Zerspanung von 100Cr6 bis zu einem Eingriffsweg von $L_f = 50$ mm resultieren, Tabelle 3-11.

Tabelle 3-11: Gegenüberstellung der CO₂-Emission verschiedener Kühlstrategien

Rohstoff	Einheit	WO ₃	Co
Prozentualer Anteil in HW-K40	%	0,88	0,12
Preis pro Tonne [BUN21]	€ t ⁻¹	205,26	42.458,19
Herstellung			
Schneidstoff		HW-K40	
m_{WSP} für $s = 4,76$ mm	g	11,15	
m_{WSP} für $s = 2,38$ mm	g	5,58	
Rohstoffkosten für HW-K40	€ Stk. ⁻¹	0,059	
Stromkosten [FUR19]	kWh kg ⁻¹	19,30	
Stromkosten pro Werkzeug	kWh Stk. ⁻¹	0,215	
spezifische CO ₂ -Emission für $s = 4,76$ mm	g Stk. ⁻¹	86,32	
spezifische CO ₂ -Emission für $s = 2,38$ mm	g Stk. ⁻¹	43,16	
Zerspanung			
Trockener Schnitt			
Schnittkraft F_c	N	192	
Schnittarbeit W_c	kWh	0,0095	
spezifische CO ₂ -Emission	g Stk. ⁻¹	3,81	
Innenkühlung mit $T_F = 20$ °C			
Schnittkraft F_c	N	179	
Schnittarbeit W_c	kWh	0,0088	
spezifische CO ₂ -Emission	g Stk. ⁻¹	3,55	
Innenkühlung, $T_F = 5$ °C			
Schnittkraft F_c	N	140	
Schnittarbeit W_c	kWh	0,0069	
spezifische CO ₂ -Emission	g Stk. ⁻¹	2,78	

Es ist ersichtlich, dass die CO₂-Emissionen, welche während der Herstellung einer WSP durch Hydro-, Pyro- und Pulvermetallurgie entstehen, durch den Einsatz von CNMN120208 gegenüber CNMN120408 um 50 % reduziert werden können. Die Verwendung von WSP mit Dicken von $s = 1,58$ mm stellt hierbei ein zusätzliches Einsparpotenzial von CO₂ dar. Im Hinblick auf die Zerspanung von 100Cr6 mit HW-K40 ist der Hauptspindeltrieb der Werkzeugmaschine als relevanter Energieverbraucher zu identifizieren. Dessen abgeleitete CO₂-Emissionen basieren auf den eingesetzten Prozessparametern und der hierbei erzeugten Schnittarbeit W_c bis zum definierten Eingriffsweg L_f . Im Ergebnis können CO₂-Emissionen durch Anwendung einer Innenkühlung mit einer Fluidtemperatur von $T_{ein} = 20$ °C gegenüber der Trockenbearbeitung um 6,8 % reduziert werden. Durch den Einsatz einer Fluidtemperatur von $T_{ein} = 5$ °C ist eine CO₂-Einsparung um 27,1 % realisierbar. Die kumulierten CO₂-Emissionen für Herstellung und Zerspanung sind in Bild 3-43 dargestellt. Der Stromverbrauch von Pumpe und Wärmetauscher wurde in der Analyse nicht betrachtet, da diese im laufenden Betrieb vernachlässigbare CO₂-Emissionen erzeugen.

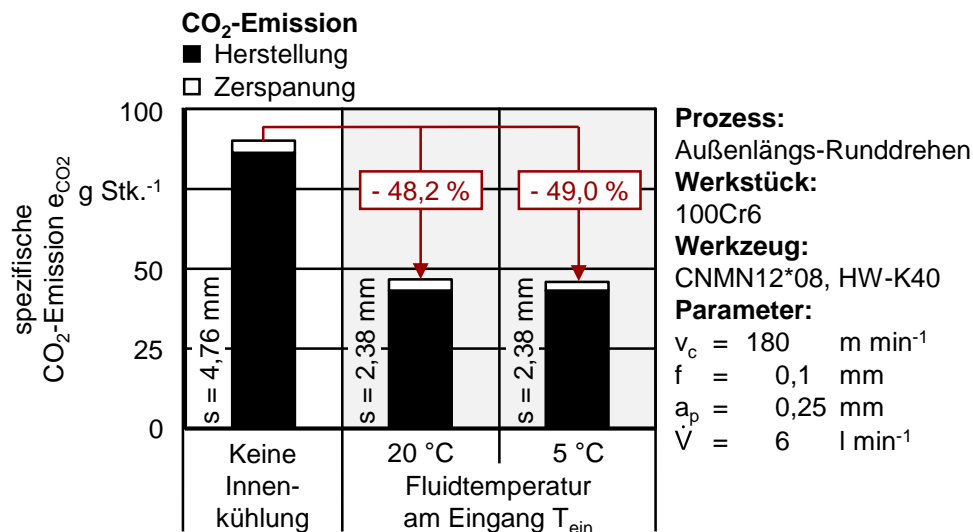


Bild 3-43: Spezifische CO₂-Emission e_{CO_2} eines HW-K40-Werkzeugs nach der spanenden Bearbeitung von 100Cr6

Aus ökonomischer Sicht ergibt sich weiterhin eine Reduzierung der Werkzeugkosten, welche sich durch den Einsatz des geschlossen-innengekühlten Werkzeugsystems und der daraus resultierenden Standzeiterhöhung ergibt, Tabelle 3-12. Grundlage für die Berechnungen ist eine maximale Verschleißmarkenbreite von $VB_{max} = 0,2$ mm. Die eingesetzten WSP befanden sich hierbei im Bereich eines linear-steigenden Freiflächenverschleißes.

Tabelle 3-12: Resultierende Werkzeugkosten in Abhängigkeit der Kühlstrategie

Parameter	Einheit	Trockenbearbeitung	Innenkühlung mit $T_F = 20$ °C	Innenkühlung mit $T_F = 5$ °C
Standvolumen V_T bei $VB_{max} = 0,2$ mm	cm ³	5,33	6,47	7,18
Werkzeugkosten bei $VB = 0,2$ mm	€	10,00	8,24	7,42
Werkzeugkosten pro cm ³	€ cm ⁻³	1,88	1,27	1,03

Basierend auf den durchschnittlichen Werkzeugkosten von $p_{wz} = 10,00 \text{ €}$ führt der Einsatz eines geschlossen-innengekühlten Werkzeugsystems zu einer prozentualen Kosteneinsparung von 32,4 % für $T_{\text{ein}} = 20 \text{ °C}$ sowie von 44,9 % für $T_{\text{ein}} = 5 \text{ °C}$. Hierbei sind zusätzliche Einsparungen innerhalb der Herstellung durch die Reduzierung der WSP-Dicke und der damit assoziierten Rohstoffeinsparung nicht betrachtet worden.

4 Fazit

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde ein geschlossen-innengekühltes Werkzeugsystem mit Hilfe der methodischen Produktentwicklung nach VDI 2221 entwickelt. Im Vordergrund stand die Realisierung einer Innenkühlung für die Drehbearbeitung mit WSP, welche unter industriellen Rahmenbedingungen einsetzbar ist. Die hierbei abgeleiteten Anforderungen, wie eine hohe Kühleffizienz, niedrige Fertigungskosten, Kompatibilität durch standardisierte Schnittstellen und keine negative Beeinträchtigung bestehender Systeme konnte erfolgreich umgesetzt werden. So wurden unterschiedliche Varianten des Werkzeugsystems realisiert, welche eine externe und interne Kühlfluidführung für konventionelle Vierkant- als auch für Capto®-Werkzeughalter ermöglicht. Darüber hinaus sind unterschiedliche WSP-Dicken und Spannkonzepete einsetzbar. Der modulare Aufbau des innengekühlten Gesamtsystems ermöglicht den beteiligten Kooperationspartnern hierbei eine einfache Weiterentwicklung im Hinblick auf zusätzliche Geometriespezifikationen der WSP. Darüber hinaus wurde eine nahtlose Integration der ausgelegten Werkzeugperipherie, der Messtechnik innerhalb der Werkzeugmaschine und dessen Steuerung erfolgreich umgesetzt. Im Ergebnis kann festgestellt werden, dass infolge einer thermischen Lastreduzierung der Einsatz des entwickelten geschlossen-innengekühlten Werkzeugsystems eine Werkzeugstandzeiterhöhung im Bereich der Weich- und Hartbearbeitung von Stahl ermöglicht. Aus ökologischer Sicht ist zusätzlich von reduzierten CO₂-Emissionen durch den Einsatz von WSP-Dicken mit $s < 4,76$ mm und einer Erhöhung des Standvolumens V_T von bis zu 35 % unter Verwendung der Innenkühlung auszugehen.

5 Literaturverzeichnis

- BRI08 Brinksmeier, E.; Koch, T.; Walter, A.: Wie viel Schmierstoff ist nötig? – Effizienter Einsatz von Kühlschmierstoff. In: Industrial Ecology – Erfolgreiche Wege zu nachhaltigen industriellen Systemen, 1. Auflage. Hrsg.: von Gleich, A.; Gößling-Reisemann, S., Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2008.
- BUN21 Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Preismonitor. Januar 2021. Hannover: Firmenschrift. 2021.
- BUD08 Budak, E.; Ozlu, E.: Development of thermomechanical cutting process model for machining process simulations. CIRP Annals - Manufacturing Technology 57 (2008) 1, S. 97 - 100.
- DEN18 Denkena, B.; Grove, T.; Lahres, M.; Weidle, A.: Einfluss von Kühlschmierstoffen auf die Leichtbaustahlbearbeitung. VDI-Z Integrierte Produktion (2018) 3. URL: <https://www.vdi-z.de/2018/Ausgabe-03/Kuehlschmierstoffe/Einfluss-von-Kuehlschmierstoffen-auf-die-Leichtbaustahlbearbeitung> (Zugriff: 2018-08-14).
- DEU10 Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV): Minimum quantity lubrication for machining operations. BGI/GUV-I 718 E. Berlin. Firmenschrift. 2010.
- DEU11 Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV): Regel - Tätigkeiten mit Kühlschmierstoffen BGR/GUV-R 143. Berlin. Firmenschrift. 2011.
- DEU16 Deutsche Edelstahlwerke GmbH: Werkstoffdatenblatt Cf53 1.1213. Witten. Firmenschrift. 2016.
- DFG16 Deutsche Forschungsgemeinschaft - Die Vorsitzende der Ständigen Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe: MAK- und BAT-Werte-Liste 2016 - Maximale Arbeitsplatzkonzentrationen und Biologische Arbeitsstofftoleranzwerte. Weinheim: Wiley-VCH, 2016.
- DOE17 Döhrn, R.: Die Lage am Stahlmarkt: Nachfrage nach Stahl belebt sich. RWI Konjunkturberichte 68 (2017) 2, S. 35 - 44.
- FUE18 Fürstmann, P.: Einsatzverhalten und Leistungsbedarfe unterschiedlicher Kühlmethoden beim Außen-Längs-Runddrehen. Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin. Hrsg.: Uhlmann, E. Dissertation, Technische Universität Berlin. Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2018.
- FUR19 Furberg, A.; Arvidsson, R.; Molander, S.: Environmental life cycle assessment of cemented carbide (WC-Co) production. Journal of Cleaner Production 209 (2019) S. 1126 - 1138.
- GAR19 García, J.; Ciprés, V. C.; Blomqvist, A.; Kaplan, B.: Cemented carbide microstructures: a review. International Journal of Refractory Metals & Hard Machining 80 (2019) S. 40 - 68.
- HAN19 Handke, V.; Hross, M.; Bliklen, R.; Jepsen, D.; Rödig, L.: Recycling im Zeitalter der Digitalisierung. Spezifische Recyclingziele für Metalle und Kunststoffe aus Elektrokleingeräten im ElektroG: Regulatorische Ansätze. Berlin: NABU - Naturschutzbund Deutschland e.V., 2019.
- HEI14 Heisel, U.; Klocke, F.; Uhlmann, E.; Spur, G.: Handbuch Spanen. München, Carl Hanser, 2014.

- HER17 Herrmann C., Madanchi, N.; Winter, M.; Öhlschläger, G.; Greßmann, A.; Zettl, E.; Schwengers, K.; Lange, U.: Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands - Wassermischbare Kühlschmierstoffe. In: VDI ZRE Publikationen - Studien. Hrsg.: VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE), Düsseldorf: VDI, 2017.
- IBC19 IBC Wälzlager GmbH: Wälzlagerwerkstoffe. Wetzlar. Firmenschrift. 2019.
- KLO18 Klocke, F.: Fertigungsverfahren 1 - Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide, Berlin: Springer, 2018.
- KUC13 Kuchenmeister, R.: Ein Quantensprung in Effizienz. Werkstatt und Betrieb 9 (2013) S. 174 - 177.
- LUT16 Lutter, S.; Giljum, S.; Lieber, M.; Manstein, C.; (Hrsg): Die Nutzung natürlicher Ressourcen. Bericht für Deutschland 2016. Melk: gugler*print, 2016.
- NEU12 Neugebauer, R. (Hrsg.): Werkzeugmaschinen. Aufbau, Funktion und Anwendung von spanenden und abtragenden Werkzeugmaschinen. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2012.
- ÖST17 Östlund, J.: Kann Trockenbearbeitung die Prozessflüssigkeit ersetzen? Wallenius Water Innovationen (2017). URL: <http://www.walleniuswater.com/prozessflussigkeiten/blog/kann-trockenbearbeitung-die-prozessflussigkeit-ersetzen> (Zugriff: 2021-06-01).
- PAN17 Pankow, G.: Smogalarm: Fabriken in China unter Zugzwang - Deutsche müssen Vorreiter sein. Produktion - Technik und Wirtschaft für die deutsche Industrie. URL: <https://www.produktion.de/trends-innovationen/smogalarm-fabriken-in-china-unter-zugzwang-305.html> (Zugriff: 2018-08-01).
- ROL12 Roland Berger School of Strategy and Economics: Thoughts Megatrends. München. Firmenschrift. 2012.
- SHR12 Shrot, A.; Bäker, M.: Determination of Johnson-Cook parameters from machining simulations. Computational Materials Science 52 (2012) S. 298 - 304.
- SIM17 Simic, A. K.; Gül, O.; Lauenstein, P.: Branchen Analyse Stahlindustrie. Entwicklungstrends und Zukunftschancen. Study. Hrsg.: Hans-Böckler-Stiftung. Stuttgart: Doppelpunkt, 2017.
- TAK81 Sata, T.; Takeuchi, Y.; Sakamoto, M.; Weck, M.: Improvement of Working Accuracy on NC Lathe by Compensation for the Thermal Expansion of Tool. CIRP Annals - Manufacturing Technology 30 (1981) 1, S. 445 - 449.
- TIS19 TIS Wälzkörpertechnologie GmbH: Hartmetall K20. Gauting. Firmenschrift. 2019.
- UHL16a Uhlmann, E.; Peukert, B.; Thom, S.; Prasol, L.; Fürstmann, P.; Sammler, F.; Richarz, S.: Solutions for Sustainable Machining. Journal of Manufacturing Science and Engineering 139 (2016) 5, S. 051009-1 - 051009-7.
- UHL17a Uhlmann, E.; Lang, K.-D.; Prasol, L.; Thom, S.; Peukert, B.; Benecke, S.; Wagner, E.; Sammler, F.; Richarz, S.; Nissen, N. F.: Sustainable Solutions for Machine Tools. In: Sustainable Manufacturing: Challenges, Solutions and Implementation Perspectives. Hrsg.: Stark, R. et al.: SpringerOpen, 2017, S. 47 - 69.
- UHL18 Uhlmann, E.; Riemer, H.; Schröter, D.; Henze, S.; Sammler, F.; Barthelmä, F.; Frank, H.: Investigation of wear resistance of coated PcBN turning tools for hard machining. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials 72 (2018), S. 270 - 275.

- UMW20 Umweltbundesamt: Bilanz 2019: CO₂-Emissionen pro Kilowattstunde Strom sinken weiter. Dessau-Roßlau: Pressemitteilung. 2020. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/bilanz-2019-co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom> (Zugriff: 2021-03-19).
- VDM16 Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) e.V.: Frische Luft am Arbeitsplatz - Kühlschmierstoffe - Ein Leitfaden für die Praxis. Frankfurt am Main. Firmenschrift. 2016.
- VSI18 Verband Schmierstoff-Industrie e. V.: Kühlschmierstoffe. Hamburg, Firmenschrift. 2018.

Normen und Richtlinien

- DIN513 DIN ISO 513, (05.2014) Klassifizierung und Anwendung von harten Schneidstoffen für die Metallzerspanung mit geometrisch bestimmten Schneiden; Bezeichnung der Hauptgruppen und Anwendungsgebiete (ISO 513:2012). Berlin: Beuth.
- DIN1832 DIN ISO 1832, (06.2017) Wendeschneidplatten für Zerspanwerkzeuge - Bezeichnung (ISO 1832:2017). Berlin: Beuth.
- DIN10889-1 DIN ISO 10889-1, Teil 1, (01.2006) Werkzeughalter mit Zylinderschaft; Zylinderschaft, Aufnahmebohrung; Technische Lieferbedingungen (ISO 10889-1: 2004). Berlin: Beuth.
- DIN51385 DIN 51385, (12.2013) Schmierstoffe. Bearbeitungsmedien für die Umformung und Zerspanung von Werkstoffen. Begriffe. Berlin: Beuth.
- ISO3685 ISO 3685, (11.1993) Tool-life testing with single-point turning tools. Genf, Schweiz: International Organization For Standardization.
- VDI2221-1 VDI 2221-1, Blatt 1, (11.2019) Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung. Berlin: Beuth.
- VDI3397-3 VDI 3397-3, Blatt 3, (10.2016) Entsorgung von Kühlschmierstoffen. Berlin: Beuth.

6 Erklärung zur Einreichung des Abschlussberichts

Hiermit bestätigen wir die Anfertigung des Abschlussberichts zum Forschungsvorhaben „Innengekühltes Werkzeugsystem für die Trockenbearbeitung“ und geben die Einreichung durch das Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb der Technischen Universität Berlin frei.

Berlin, den 22.09.2021
.....
Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb
Technische Universität Berlin

.....
Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann

7 Anlagenverzeichnis

Anlage A-1: Kriterien und Bewertungsschlüssel für Produkt- und Prozess-FMEA

Auftreten	
Wahrscheinlichkeit des Auftretens (Fehler kann vorkommen)	
unwahrscheinlich	= 1
sehr gering	= 2 - 3
gering	= 4 - 6
mäßig	= 7 - 8
hoch	= 9 -10
Bedeutung	
Auswirkungen auf den Kunden	
kaum wahrnehmbar	= 1
unbedeutender Fehler	= 2 - 3
mäßig schwerer Fehler	= 4 - 6
schwerer Fehler	= 7 - 8
äußerst schwerer Fehler	= 9 -10
Entdeckung	
Wahrscheinlichkeit der Entdeckung (vor Auslieferung an Kunden)	
hoch	= 1
mäßig	= 2 - 3
gering	= 4 - 6
sehr gering	= 7 - 8
unwahrscheinlich	= 9 -10
RPZ - Risiko-Prioritätszahl	
hoch	<= 1000
mittel	<= 250
gering	<= 125
kein	= 1

Anlage A-2: Produkt-FMEA, Seite 1/3

FEHLER-MÖGLICHKEITS- UND-EINFLUSS-ANALYSE Produkt-FMEA: <input checked="" type="checkbox"/> Prozess-FMEA: <input type="checkbox"/>				Projektname				
				InWeT				
				Produktname				
				Geschlossen-innengekühltes Werkzeugsystem				
Möglicher Fehler / Fehlfunktion	Bedeutung	Mögliche Fehlerfolge	Mögliche Fehlerursachen	Derzeitiger Zustand				
				Vermeidungs- maßnahmen	Auftreten	Entdeckungs- maßnahmen	Entdeckung	RPZ Risikopriori- tätszahl
1. Produktmerkmal: Kühlkreislauf								
Keine / unzureichende Kühlung an Wirkstelle	10	Erhöhter Verschleiß, schlechtere Bauteilqualität	Wärmeübergang WSP / Kühlplatte zu gering	CFD-Simulation/ Thermische Analyse	6	Sichtprüfung WSP und Werkstück	4	240
			Leitungsquerschnitt im Kühlkörper zu gering	CFD-Simulation	4	Sichtprüfung WSP und Werkstück	2	80
			Leitungsquerschnitt im Werkzeughalter zu gering	CFD-Simulation	4	Sichtprüfung WSP und Werkstück	2	80
2. Produktmerkmal: WSP								
Fixierung unzureichend	8	Schlechtere Bauteilqualität, Maßungenaugkeiten, Unterbrechung Fertigungsprozess	Spannkraft durch Spannfinger unzureichend	Statische Simulation	4	Sichtprüfung nach Probelauf	4	128
			Toleranzen WSP-Sitz fehlerhaft	Statische Simulation, Toleranzanalyse	4	Sichtprüfung	4	128
3. Produktmerkmal: Werkzeughalter								
Eingriffsbedingungen fehlerhaft	7	Schlechtere Bauteilqualität / Maßungenaugkeiten	Einstell- und Spanwinkel fehlerhaft	Toleranzanalyse	4	Sichtprüfung nach Probelauf	2	56
Keine / unzureichende Weiterleitung des Kühlmittels	8	Keine / unzureichende Weiterleitung des Kühlmittels zur Kühlplatte	Leitung mit Fremdpartikeln verstopft	Kühlmittel filtern	3	Sichtprüfung, Spülen mit niedrigem Druck	5	120
			Schnittstelle Schlauch / Werkzeughalter undicht oder nicht angeschlossen	Montageplan erstellen	3	Sichtprüfung, Spülen mit niedrigem Druck	5	120
			Fertigung der Kanäle fehlerhaft	Regelmäßige Qualitätskontrollen	4	Sichtprüfung, Spülen mit niedrigem Druck	3	96
Fixierung unzureichend	8	Schlechtere Bauteilqualität, Maßungenaugkeiten, Unterbrechung Fertigungsprozess	Toleranzen des Polygonschafts fehlerhaft	Toleranzanalyse	4	Sichtprüfung nach Probelauf	4	128

Anlage A-3: Produkt-FMEA, Seite 2/3

Möglicher Fehler / Fehlfunktion	Bedeutung	Mögliche Fehlerfolge	Mögliche Fehlerursachen	Derzeitiger Zustand				
				Vermeidungsmaßnahmen	Auftreten	Entdeckungsmaßnahmen	Entdeckung	RPZ Risikoprioritätszahl
4. Produktmerkmal: Kühlkörper								
Fixierung unzureichend	8	Leckage, Maßungengenauigkeiten / Schlechtere Bauteilqualität	Toleranzen fehlerhaft	Toleranzanalyse	5	Sichtprüfung nach Probelauf	4	160
Plastische Verformung	10	Keine / unzureichende Kühlung an Wirkstelle	Festigkeit ungenügend	Statische Simulation	4	Sichtprüfung nach Probelauf	4	160
5. Produktmerkmal: Kühlplatte								
Fixierung unzureichend	8	Keine / unzureichende Kühlung an Wirkstelle	Klebefläche zu gering / Kleber ungeeignet	Simulation	4	Probelauf	4	128
6. Produktmerkmal: Spannfinger								
Fixierung der WSP unzureichend	8	Schlechtere Bauteilqualität, Maßungengenauigkeiten, Unterbrechung Fertigungsprozess	Toleranzen fehlerhaft	Toleranzanalyse	4	Sichtprüfung nach Probelauf	4	128
Plastische Verformung	10	Unzureichende Fixierung WSP	Festigkeit ungenügend	Statische Simulation	4	Sichtprüfung nach Probelauf	4	160
7. Produktmerkmal: Pumpe								
Kein / unzureichender Druckaufbau	8	Keine / unzureichende Weiterleitung des Kühlmittels	Pumpe defekt	Wareneingangskontrolle, Probelauf	2	Druckprüfung	2	32
			Pumpe falsch eingestellt	Anleitung für Einstellung	3	Druckprüfung	3	72
Keine / unzureichende Weiterleitung des Kühlmittels in Pumpe	8	Keine / unzureichende Weiterleitung des Kühlmittels	Kühlmittel im Tank nicht vorhanden	Akustische oder optische Rückmeldung bei niedrigem Füllstand	7	Sichtprüfung	1	56
			Leckage	Ausreichende Dimensionierung	1	Sichtprüfung	2	16
			Leitung verstopft, Mindestradius nicht eingehalten	Kühlmittel filtern	4	Spülen mit niedrigem Druck	5	160

Anlage A-4: Produkt-FMEA, Seite 3/3

Möglicher Fehler / Fehlfunktion	Bedeutung	Mögliche Fehlerfolge	Mögliche Fehlerursachen	Derzeitiger Zustand				
				Vermeidungsmaßnahmen	Auftreten	Entdeckungsmaßnahmen	Entdeckung	RPZ Risikoprioritätszahl
8. Produktmerkmal: Schläuche und Steckverbinder								
Keine / unzureichende Weiterleitung des Kühlmittels in den Schläuchen	8	Keine / unzureichende Weiterleitung des Kühlmittels	Schnittstelle Schlauch / Pumpe undicht oder nicht angeschlossen	Montageplan erstellen	3	Spülen mit niedrigem Druck	5	120
Versagen der Steckverbinder und Schläuche	10	Keine / unzureichende Weiterleitung des Kühlmittels	Pumpe führt kein Kühlmittel	Probelauf	2	Probelauf	5	80
9. Produktmerkmal: Temperatursensor und Sensoraufnahme								
Keine / unzureichende Weiterleitung des Kühlmittels in der Sensoraufnahme	8	Keine / unzureichende Weiterleitung des Kühlmittels	Leitungsquerschnitt ungünstig	CFD-Simulation	3	Probelauf	3	72
			Schnittstelle Schlauch / Sensoraufnahme undicht oder nicht angeschlossen	Montageplan erstellen	3	Sichtprüfung, Spülen mit niedrigem Druck	3	72
			Leitung mit Fremdpartikeln verstopft	Kühlmittel filtern	5	Sichtprüfung, Spülen mit niedrigem Druck	3	120
Keine Temperaturmessung	4	Keine Temperaturewertung	Temperatursensor defekt	Wareneingangskontrolle, Probelauf	2	Sichtprüfung, Spülen mit niedrigem Druck	2	16
10. Produktmerkmal: Kühlaggregat								
Kühlmitteltemperatur nicht konstant gehalten	10	Keine / unzureichende Kühlung an Wirkstelle	Wärmetauscher im Kühlaggregat defekt / nicht ausreichend dimensioniert	Wareneingangskontrolle, Probelauf	4	Kühlung im Leerlauf fahren	4	160

Anlage A-5: Prozess-FMEA, Seite 1/2

FEHLER-MÖGLICHKEITS- UND-EINFLUSS-ANALYSE Produkt-FMEA: <input type="checkbox"/> Prozess-FMEA: <input checked="" type="checkbox"/>				Projektname				
				InWeT				
				Prozessname				
				Fertigung des geschlossen-innengekühlten Werkzeugsystems				
Möglicher Fehler / Fehlfunktion	Bedeutung	Mögliche Fehlerfolge	Mögliche Fehlerursachen	Derzeitiger Zustand				
				Vermeidungs- maßnahmen	Auftreten	Entdeckungs- maßnahmen	Entdeckung	RPZ Risikoprioritätszahl
1. Prozessschritt: Fertigung des Werkzeughalters								
Kanäle nicht durchgängig gefertigt	8	Keine / unzureichende Weiterleitung des Kühlmittels	Bohrvorgang fehlerhaft	Programmierung überprüfen	2	Sichtprüfung, Spülen mit niedrigem Druck	2	32
Kanäle mit zu kleinem Durchmesser gefertigt	8	Keine / unzureichende Weiterleitung des Kühlmittels	Bohrvorgang fehlerhaft	Programmierung überprüfen	2	Vollprüfung	6	96
Kanäle mit zu großem Durchmesser gefertigt	8	Undichtigkeit, keine / unzureichende Weiterleitung des Kühlmittels	Bohrvorgang fehlerhaft	Programmierung überprüfen	2	Vollprüfung	6	96
Geometrie des Schafts fehlerhaft	9	Fixierung unzureichend	CNC-Programmierung fehlerhaft	Programmierung überprüfen	2	Vollprüfung	2	36
Kanäle zu nah am Rand gefertigt	9	Undichtigkeit, keine / unzureichende Weiterleitung des Kühlmittels	CNC-Programmierung fehlerhaft	Programmierung überprüfen	2	Vollprüfung	2	36
2. Prozessschritt: Fertigung der WSP								
Geometrie fehlerhaft	9	ungewollte Formgebung am Werkstück	CNC-Programmierung fehlerhaft	Programmierung überprüfen	2	Vollprüfung	6	108
		WSP passt nicht an Werkzeughalter	CNC-Programmierung fehlerhaft	Programmierung überprüfen	2	Vollprüfung	6	108
3. Prozessschritt: Fertigung der Sensoraufnahme								
Kanäle mit zu kleinem Durchmesser gefertigt	8	Keine / unzureichende Weiterleitung des Kühlmittels	Bohrvorgang fehlerhaft	Programmierung überprüfen	2	Vollprüfung	3	48
4. Prozessschritt: Fertigung des Kühlkörpers								
Kanäle mit zu kleinem Durchmesser gefertigt	9	Keine / unzureichende Kühlung an Wirkstelle	CNC-Programmierung fehlerhaft	Programmierung überprüfen	2	Vollprüfung	3	54

Anlage A-6: Prozess-FMEA, Seite 2/2

Möglicher Fehler / Fehlfunktion	Bedeutung	Mögliche Fehlerfolge	Mögliche Fehlerursachen	Derzeitiger Zustand				
				Vermeidungsmaßnahmen	Auftreten	Entdeckungsmaßnahmen	Entdeckung	RPZ Risikoprioritätszahl
5. Prozessschritt: Fertigung des Höhenmaßes								
Kanäle mit zu kleinem Durchmesser gefertigt	8	Keine / unzureichende Kühlung an Wirkstelle	CNC-Programmierung fehlerhaft	Programmierung überprüfen	2	Vollprüfung	3	48
6. Prozessschritt: Fertigung des Spannfingers								
Geometrie fehlerhaft	9	Fixierung der WSP unzureichend	CNC-Programmierung fehlerhaft	Programmierung überprüfen	2	Vollprüfung	4	72
7. Prozessschritt: Auftrag des Flächendichtmittels zwischen den mechanischen Komponenten								
Dichtmittel haftet unzureichend	6	Undichtigkeit, keine / unzureichende Weiterleitung des Kühlmittels	Oberflächen vorm Auftragen nicht gereinigt	Oberfläche reinigen	3	Spülen mit niedrigem Druck	2	36
8. Prozessschritt: Montage des Kühlkörpers am Werkzeughalter								
Fixierung des Kühlkörpers unzureichend	8	Keine / unzureichende Kühlung an Wirkstelle	Gewinde defekt	Prüfung nach Fertigung	2	Vollprüfung	2	32
9. Prozessschritt: Kleben der Kühlplatte								
Klebmenge zu gering	6	Fixierung unzureichend	Klebeanweisung uneindeutig	Menge definieren	3	Probelauf	6	108
10. Prozessschritt: Montage der WSP mit dem Spannfinger am Werkzeughalter								
Fixierung der WSP unzureichend	9	Kein Abtrennen von Material, Maßungenaugigkeit, Unterbrechung des Fertigungsprozesses	Gewinde defekt	Prüfung nach Fertigung	2	Vollprüfung	2	36
			Anzugsmoment zu gering	Prüfung nach Montage	2	Drehmoment-schlüssel verwenden	6	108
11. Prozessschritt: Montage des Werkzeughalters in der Werkzeugaufnahme								
Fixierung unzureichend	9	Maßungenaugigkeit, Unterbrechung des Fertigungsprozesses	Anzugsmoment zu gering	Prüfung nach Montage	2	Drehmoment-schlüssel verwenden	6	108
12. Prozessschritt: Montage der Schläuche mit Steckverbinder								
Schnittstelle undicht	8	Keine / unzureichende Weiterleitung des Kühlmittels	Teile fehlerhaft	Wareneingangskontrolle	2	Spülen mit niedrigem Druck	4	64