



**Maier Werkzeugmaschinen GmbH & Co. KG  
Hazec Präzisionstechnik GmbH & Co. KG  
Institut für Werkzeugmaschinen (IfW) Universität Stuttgart**

---

# Ressourceneffiziente Zerspanung auf Langdrehmaschinen

---

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 35775/01 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Von

**Michael Maier**  
August, 2023

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	II
Nomenklatur .....	IV
1. Zusammenfassung.....	1
1.1 Durchgeführte Untersuchungen, Entwicklungen, Modellanwendungen mit Angabe des Ziels .....	1
1.2 Erzielte Ergebnisse.....	2
1.3 Empfehlungen für das weitere Vorgehen .....	2
1.4 Angabe von Kooperationspartnern und Hinweis auf die Förderung des Vorhabens durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt mit Angabe des Aktenzeichens (Az: 35775/01);.....	3
2. Einleitung .....	4
3. Hauptteil.....	9
4. Fazit.....	33
5. Literaturverzeichnis .....	35
6. Anhang .....	37
6.1 Anhang A1 .....	37

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Referenzwerkstück und Versuchsträger Langdrehmaschine Maier F4 .....	9
Abbildung 2: Späneansammlungen (sog. „Spänenester“) bei Überflutungskühlung, nahezu alle Oberflächen des Arbeitsraums sind ölbenetzt.....	10
Abbildung 3: Bilanzierung der Stoffströme .....	11
Abbildung 4: Messtechnische Ausstattung (Beispielbilder).....	12
Abbildung 5: Temperaturverläufe an diversen Maschinen-Messstellen und Antrieben.....	13
Abbildung 6: Korrelationen unterschiedlicher Temperatur-Messstellen zur Öltemperatur	14
Abbildung 7: Simulationsumgebung zum Thermohaushalt des Versuchsträgers.....	15
Abbildung 8: Modell der Aufteilung der Prozess-Wärmeleistung auf Späne, Werkzeug und Werkstück unter Trockenbedingungen (Tönshoff et al /15/) .....	15
Abbildung 9: Wärmeübergangskoeffizienten bei Strahl- und bei Sprühkühlung nach /17, 18/ .....	16
Abbildung 10: links: FEM-Modell für die thermische Simulation, rechts: Baugruppenbezeichnung und thermische Kontakte zwischen Baugruppen/-teilen.....	17
Abbildung 11: Lastprofile an den Hauptantrieben des Versuchsträgers bei der Referenzbearbeitung .....	18
Abbildung 12: Thermisches FEM-Modell des Versuchsträgers und Vergleich von Modellergebnissen und Messungen (exemplarisch) .....	18
Abbildung 13: Simulierte thermische Verformungen des Versuchsträgers, Vergleich von Ergebnissen bei konventioneller Öl-Überflutungskühlung und MMS-Kühlung .....	19
Abbildung 14: Versuchsssetup in Gildemeister CTX 420 linear: a: HPM MMS-Dosiersystem, b: Düse 1, c: Mischkopf Düse 2, d: Arbeitsraum mit Werkstück, e: KISTLER 8-kanal Ladungsverstärker für Dynamometer, f: National Instruments PXi Datenerfassung .....	21
Abbildung 15: v.l.n.r. Schnittkräfte $F_c$ , $F_p$ und $F_v$ , Werkzeugtemperaturen $T_1$ und Momentenbildender Strom-Istwert $I_q$ ; obere Reihe: Trockenbearbeitung, untere Reihe: Bearbeitung unter MMS-Bedingungen mit 90% MSS-Volumenstrom, beide exemplarisch für $a_p = 1,5$ mm.....	22
Abbildung 16: Temperaturen am Werkzeughalter direkt neben der Wendeschneidplatte (Pos. siehe Abb. 14), links: bei unterschiedlichen Technologieparametern, rechts: maximal auftretende Temperatur bei verschiedenen Schnitttiefen (Spanlasten).....	23
Abbildung 17: Vergleich der Verhältnisse unter Öl- bzw. MMS-Kühlschmierung.....	23
Abbildung 18: Entwicklung der Schnittkräfte, Werkstück und Werkzeugtemperaturen und Spindelbelastung bei Erwärmung durch rasche Bearbeitungsabfolge.....	24
Abbildung 19: obere Reihe: Erwärmung durch rasche Bearbeitungsabfolge mit $v_c = 190$ m/min und $a_p = 1,0$ mm, untere Reihe: Abkühlung durch Konvektion an Luft.....	25

---

Abbildung 20: obere Reihe: Erwärmung durch rasche Bearbeitungsabfolge mit $v_c = 190$ m/min und $a_p = 1,0$ mm, untere Reihe: Abkühlung durch Konvektion an Luft.....	26
Abbildung 21: Designentwurf des IfW für eine hinterlüftete Thermoschild-Bepankung im Späneschacht und im hinteren Arbeitsraum unter der Führungsbuchse.....	27
Abbildung 22: Maschinenbett aus Zementbeton (angepasst an höchste thermische Beanspruchung) .....	28
Abbildung 23: Prinzip Langdrehen: 1. Spindel mit Z-Bewegung, 2. Führungsbuchse.....	29
Abbildung 24: MMS Gerät LSJ Mini von HPM angeschlossen an die Langdrehmaschine .....	30
Abbildung 25: Zuführung des MMS Mediums direkt an die Führungsbuchse über Schmierleitung .....	31
Abbildung 26: Konfiguration MMS Drehversuche, Zuführung MMS über Sprühdüsen von außen .....	32

## Nomenklatur

$\alpha$	Wärmeübergangskoeffizient [W/(m <sup>2</sup> ·K)]
$a_p$	Spanungsdicke, Schnitttiefe [mm]
$c$	spezifische Wärmekapazität [J/(kg·K)]
<b>CO<sub>2</sub>e</b>	CO <sub>2</sub> -Äquivalent
<b>DMS</b>	Dehnmessstreifen
<b>FEM</b>	Finite Elemente Methode
$f_z$	Vorschub pro Umdrehung (Zahnvorschub) [mm/U.]
<b>IKZ</b>	innere Kühl-Schmiermittel-Zufuhr
$I_q$	Momentenbildender Strom-Istwert [A]
<b>K</b>	Kühlfähigkeitsindex [-]
<b>KSS</b>	Kühl-Schmierstoff
$m$	Masse [kg]
<b>M</b>	Drehmoment [Nm]
<b>MMS</b>	Minimalmengenschmierung
$n$	Drehzahl [min <sup>-1</sup> ]
<b>P</b>	Leistung [W]
$q, Q$	Wärmemenge [J]
<b>T</b>	Temperatur [in °C oder K]
$v_c$	Schnittgeschwindigkeit [m/min]

## 1. Zusammenfassung

### 1.1 Durchgeführte Untersuchungen, Entwicklungen, Modellanwendungen mit Angabe des Ziels

Im Rahmen des Entwicklungsprojekts „Ressourceneffiziente Zerspanung auf Langdrehmaschinen“ wurde erstmalig analytisch und wissenschaftlich untersucht, den konventionellen und in den zerspanenden Regionen weit verbreiteten Langdrehprozess ressourceneffizient und CO<sub>2</sub> neutral zu gestalten. Hebelpunkt ist dabei die im konventionellen Prozess eingesetzte prozessbedingte „Überflutungskühlung oder Vollstrahlkühlung“, welche bisher durch den Einsatz sehr großer Mengen Mineralöls realisiert wird. Erstmalig soll nun die aus dem Fräsen bekannte Trockenbearbeitung sowie Minimalmengenschmierung (MMS) umgesetzt werden.

Dazu war es notwendig, den Einfluss des bisherigen Kühlschmiermediums im Langdrehprozess, Mineralöl, umfassend zu verstehen und damit einen bestehenden Prozess zu analysieren. Beim Projektpartner Hazec wurde diesbezüglich eine Langdrehmaschine mit Sensorik ausgerüstet, um insbesondere den Thermohaushalt der Maschine zu erfassen.

Diese Realversuche wurden begleitet vom Projektpartner IfW, welcher die Realmaschine simulativ abbildete, um im Rahmen dieser Simulation eine zukünftige optimierte Konstruktion simulieren und optimieren zu können. Der daraus entstandene Maßnahmenkatalog ermöglichte nun den Aufbau einer optimierten Maschine.

Innerhalb dieses Vorhabens wurde die optimierte Maschine in Form eines Maschinenbetts vom Projektpartner Maier aufgebaut. Auf der optimierten Maschine wurden grundlegende Zerspanversuche für zukünftige Prozesse unter Minimalmengenschmierung (MMS) bzw. Trockenbearbeitung durchgeführt. Insbesondere lag hier das Augenmerk auf der langdreh-typischen Führungsbuchse, welche durch geeignete Prozessparameter zur MMS Bearbeitung eingestellt werden kann.

Die grundlegenden Zerspanversuche wurden seitens des IfW wissenschaftlich vertieft untersucht, um insbesondere auf Feldmaschinen zukünftig angepasste Werkzeuggeometrien verschiedenster Drehoperationen sowie Prozessparameter für robuste und qualitativ hochwertige Zerspanprozesse definieren zu können.

## 1.2 Erzielte Ergebnisse

Bei der Umstellung von Langdrehprozessen auf Trockenbearbeitung/Minimalmengenschmierung sind mehrere Faktoren zu berücksichtigen, die teils in Konkurrenz zueinander stehen. Untersuchungen in der Serienfertigung eines einzigen Projektpartners zeigen ein sehr großes Potential zur Minimierung wertvoller Mineralölressourcen und damit, bei umfangreichen Einsatz der Minimalmengenschmierung bzw. Trockenbearbeitung, ein Einsparpotential von mehreren tausend Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr.

Eine erste wichtige Erkenntnis war zur Überraschung der Projektpartner der große Einfluss bei der Temperaturführung der konventionellen Maschine durch das Kühlschmiermedium, welches zur Kühlung gedacht ist, aber insbesondere beim Serieneinsatz unter Hochdruck die Maschine erwärmt. Dabei wurde die Wärmeständigkeit des Maschinenbetts sichtbar, was sich für zukünftige, trocken durchgeführte Prozesse als positiv erweist. Das erstellte Maschinenmodell kann zur Regelung der Temperaturführung und zur Optimierung zukünftiger Maschinen in Form des Maßnahmenkatalogs angewendet werden. Die Problematik des freien Spänefalls aufgrund fehlender Spülwirkung wurde in der optimierten Bettkonstruktion unter Einhaltung des Maßnahmenkatalogs nahezu vollständig behoben. Prozessparameter für zukünftige Trockenbearbeitung und MMS wurden mithilfe grundlegender Zerspanversuche wissenschaftlich entwickelt. Daraus abgeleitet können für zukünftige trockene Anwenderprozesse die folgenden Einstellparameter empfohlen werden: Prozessparameter, Werkzeuge, Vorschübe und Zustellungen.

## 1.3 Empfehlungen für das weitere Vorgehen

Grundlegend konnten innerhalb dieses Forschungs- und Entwicklungsvorhabens die Potentiale der Trockenbearbeitung/ MMS nachgewiesen werden. Sämtliche Maßnahmen sollten nun vollständig an einer Maschine unter Berücksichtigung der definierten Prozesseinstellungen umgesetzt werden. Mithilfe dieser Maschine sollte dann eine größere Serie an Teilen produziert werden. Erst dann kann eine Feinjustierung der Prozessparameter und eine Bewertung der Maschine im Dauereinsatz erfolgen. Damit ist eine finale Bewertung der Energie- und Ressourceneffizienz und der CO<sub>2</sub> Einsparung möglich.

#### **1.4 Angabe von Kooperationspartnern und Hinweis auf die Förderung des Vorhabens durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt mit Angabe des Aktenzeichens (Az: 35775/01);**

Dieses Entwicklungsprojekt wurde von nachfolgenden Projektpartnern erfolgreich durchgeführt. Es wurde gefördert unter dem Az: 35775/01 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt.

- Maier Werkzeugmaschinen GmbH & Co. KG, Siemensstraße 10, 78564 Wehingen (vertreten durch Michael Maier/Geschäftsführer) - Hersteller von Langdrehmaschinen
- Hazec Präzisionstechnik GmbH & Co. KG, Friedrich-List-Straße 6, 78549 Spaichingen (vertreten durch Hr. Zekerya Sahin/Geschäftsführer) - Hersteller von Präzisionsdrehteilen
- Institut für Werkzeugmaschinen (IfW) der Universität Stuttgart (vertreten durch Hr. Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Möhring/Institutsleiter) – Forschungsstelle

## 2. Einleitung

Bislang beim Langdrehen unverzichtbare, mineralölbasierte Kühlschmierstoffe sind sowohl im Rahmen ihres Einsatzes als auch bezüglich ihrer Entsorgung oder Wiederaufbereitung als problematisch für die Umwelt anzusehen. Die Datenblätter von Schneidölprodukten einschlägiger Hersteller weisen die Medien als schwach bis stark wassergefährdend (WGK1-WGK3) ein, worauf von den Anwendern durch geeignete Schutzmaßnahmen zur Vermeidung der Einbringung in die öffentliche Kanalisation sowie das Erdreich reagiert werden muss. Herstellung und Wiederaufbereitung sind energieintensiv, wobei letzteres aufgrund der Verschmutzung des Schneidöls wirtschaftlich oft nicht möglich ist. Im Rahmen des Einsatzes der Medien werden große Mengen mit den erzeugten Spänen ausgeschleppt und beim Stahlrecycling verbrannt. Anhaftungen an Werkstücken müssen in Reinigungsschritten entfernt werden, wobei Energie aufgewandt wird, und Schmutzwasser entsteht.

Die Lohnzerspanung ist in einigen Regionen Deutschlands und hier insbesondere im ländlichen Raum ein wichtiger Industriezweig und Arbeitsplatzgarant mit mehreren 10tausend Beschäftigten. Häufig sind die hier angesiedelten Unternehmer Zulieferer von bedeutenden Endproduktherstellern aus den Bereichen Medizintechnik, Antriebstechnik, Automobilindustrie und Luftfahrt deren wirtschaftlicher Erfolg wiederum von der Verfügbarkeit qualitativ hochwertiger Bauteile in garantierter Stückzahl abhängt. Die spanabhebende Fertigung als Teil der produzierenden Industrie ist jedoch auch mit dem Verbrauch von Rohstoffen und Energie verbunden. Gemäß Bundesverband für Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) entfielen 2018 ca. 247,5 Mrd. kWh elektrische Energie auf die Industrie, womit sich ein Anteil von 47% am Gesamtenergiebedarf ergibt. Entsprechende Anteile am CO<sub>2</sub>-Ausstoß lassen sich basierend auf dem Strommix für 2018 mit 474 Gramm pro Kilowattstunde berechnen /1/.

Neben elektrischer Energie werden in der spanabhebenden Fertigung aber auch umweltbelastende Verbrauchsmittel wie bspw. mineralöl- und wasserbasierte Metallbearbeitungsöle eingesetzt, um die geforderte Bauteilqualität bei zuverlässigen Prozessen zu gewährleisten. Gemäß den Daten des Bundesamts für Ausfuhrkontrolle liegt die Menge der Inlandsablieferungen an wasser- und nicht wassermischbaren Metallbearbeitungsölen in Deutschland nach einem Wiederanstieg seit 2015 für das Jahr 2018 bei knapp 80 tausend Tonnen.

Einen wesentlichen Anteil hat hier die Zerspanung auf Langdrehmaschinen. Langdrehmaschinen werden in der spanabhebenden Fertigung üblicherweise zur Großserienproduktion von komplexen Präzisionsteilen mit kleinem Durchmesser und hohem Schlankheitsgrad oder Kleinteilen eingesetzt.

Als Halbzeug dienen Stangen, die in einem Lademagazin vorgehalten werden. Im Unterschied zu anderen Drehmaschinentypen wird das Werkstück von der Stange herunter bearbeitet, die sich beim Langdrehen entlang der Z-Achse (Bauteillängsachse) bewegt, während das Werkzeug in der Regel in Richtung der Z-Achse fixiert ist und senkrecht zu dieser angestellt wird. Die Serienproduktion ist bezüglich der erreichbaren Bauteilqualität und Stückzahl mit andauernd wachsenden Anforderungen konfrontiert, denen nur mit einer hocheffizienten spanabhebenden Fertigung mit entsprechenden Zielsetzungen Themenfelder wie Produktivität, Qualität aber auch Nachhaltigkeit, Arbeitssicherheit, Ressourcenverbrauch, Energieeinsatz, Emissionen und Entsorgung sind hierbei eng mit der bei der Fertigung verfolgten Kühlschmierstrategie verknüpft. Auf Langdrehmaschinen müssen nach dem Stand der Technik Verbrauchsmedien auf Mineralölbasis als Kühlschmiermedien eingesetzt werden, wobei zunehmend auch synthetische Medien zum Einsatz kommen. Die Bevorzugung von Schneidölen gegenüber wasserbasierten Kühlschmierstoffen beruht vor allem auf ihren sehr guten Schmiereigenschaften und ihrer hohen Standzeit. Im Vergleich zu wasserbasierten Kühlschmierstoffen sind Schneidöle chemisch und biologisch stabiler und müssen deutlich weniger überwacht werden. Dennoch handelt es sich im Sinne der Gefahrstoffverordnung um ökologisch und gesundheitlich kritische Prozessmedien /2/, /3/, /4/. Zudem werden zu deren Herstellung Rohöl oder chemische Grundstoffe als Ressource verbraucht. Der Einsatz von Kühlschmiermedien auf Werkzeugmaschinen erfordert darüber hinaus eine umfangreiche Peripherie. Hierzu zählt die eigentliche Kühlschmierstoffanlage mit elektrischen Förder-, Umwälz- und Druckerzeugungspumpen aber auch Kühltechnik zur Temperierung des Mediums. Weiterhin werden weitere elektrische Verbraucher wie eine KSS-Aufbereitungs- und Abluftanlagen sowie ggf. eine Späne Nachbehandlung benötigt. Da sie prozessparallel betrieben werden, tragen die genannten Aggregate einen erheblichen Anteil am Gesamtenergieverbrauch einer Werkzeugmaschine bei. Aufwand entsteht auch durch Brandlöschanlagen, die beim Einsatz von Schneidöl vorgeschrieben sind und deren Installation und regelmäßige Wartung Kosten verursachen /5/.

Mit Kühlschmierstoff benetzte Bauteile müssen gewaschen, mit Spänen ausgeschlepptes Medium muss ausgeschleudert oder durch Brikettieren aus dem Spangut entfernt werden. Auch hierbei wird durch entsprechende Aggregate Energie verbraucht.

Aus den aufgeführten Gründen sollen die ökologisch kritischen Prozessflüssigkeiten (Gefahrstoffe) in der Drehbearbeitung durch einen wirtschaftlichen und umweltfreundlichen Prozessablauf am Beispiel einer Langdrehmaschine eliminiert werden.

Über den aktuellen Stand der Technik in Bezug auf thermo-mechanische Wirkungsmechanismen von Kühlschmierstoffen (KSS) einschließlich unterschiedlicher Medienarten, der

Auswirkungen von gewünschten und unerwünschten Änderungen der Medieneigenschaften, bspw. chemischer Art, aber auch ökonomische Aspekte wird in /6/ berichtet. In /7/ wird ein Überblick über die neuesten Forschungsaktivitäten im Bereich fluidischer Elemente an Werkzeugmaschinen gegeben. Hierbei werden die in Werkzeugmaschinen verwendeten Flüssigkeiten fokussiert, also bspw. die Verwendung von fluidischen Elementen, Versorgungs- und Behandlungseinheiten und deren Einfluss auf die Leistung von Werkzeugmaschinen.

90 % aller Metallbearbeitungsprozesse erfolgt mit Hilfe von KSS. Diese übernehmen dabei drei Aufgaben: Temperierung von Werkzeug und Werkstück, Verminderung der Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück, Abtransport der Späne aus dem Bereich der Zerspanung. Inklusiv der indirekt entstehenden Abfälle wie Schleifschlämme, Ölbindemittel oder verschmutzte Putztücher verursacht der KSS-Einsatz bundesweit ein jährliches Sonderabfall-Aufkommen von ca. 1 Mio. Tonnen /8/. Neben den damit verbundenen Entsorgungskosten fallen auch Aufwendungen für die Förderung, Reinigung und Kühlung der KSS im Laufe ihrer Einsatzzeit an. Einen ökologisch und ökonomisch vielversprechenden Ansatz stellt die Bearbeitung mit Minimalmengenschmierung (MMS) dar, bei der auf eine Kühlschmierstoffaufbereitungsanlage verzichtet werden kann. Das Prinzip der MMS liegt in der gezielten Zufuhr geeigneter Schmiermedien als Aerosol direkt an die Wirkstelle der Werkzeugschneide. Hierbei werden nur wenige Milliliter ( $< 50$  ml/h) des Schmiermediums pro Stunde verbraucht (Verbrauchsschmierung).

Das Medium verflüchtigt sich hierbei idealerweise vollständig, so dass die Werkstücke und Späne anschließend trocken vorliegen. Das Potenzial zur Kosteneinsparung durch den alternativen Einsatz der MMS kann bei bis zu 15 % liegen. Das Wärmeaufkommen an der Wirkstelle ist durch den Entfall der Kühlwirkung vergleichsweise höher als bei der Nassbearbeitung. Einer dadurch progressiveren Verschleißentwicklung am Werkzeug wird u.a. durch angepasste Werkzeugkonzepte oder durch reduzierte Bearbeitungsparameter, insbesondere der Schnittgeschwindigkeit, begegnet /9/.

Bei der MMS-Gerätetechnik werden zwei unterschiedliche Prinzipien der Aerosolerzeugung verfolgt. Beim Einkanalssystem wird das Aerosol im Injektor selbst erzeugt und mittels einer einzigen Leitung an den Ort der Zerspanung geführt. Der Vorteil liegt in seiner einfachen Verrohrung sowie der meist problemlosen Unterbringung der Aerosolzuführung in der Maschinenspindel. Beim Zweikanalsystem werden Luft und Fluid getrennt bis kurz vor den Ort der Zerspanung in zwei oder mehreren Leitungen transportiert. Die Aerosolbildung erfolgt in einem Sprühkopf, aus dem das Aerosol durch eine Düse austritt. Mit weiteren ringförmig

angeordneten Düsen kann ein leitender Luftmantel erzeugt werden. Das System ist aufwändiger, da mehrere Leitungen parallel durch die Maschine verlegt werden müssen. Der Sprühkopf muss im Bereich der Spindel untergebracht werden, d.h. eine mehrkanalige Durchführung durch die Spindel ist erforderlich. Einer der Vorteile liegt darin, dass sich das Aerosol auf seinem Weg zum Ort der Zerspanung nicht absetzen kann, bzw. entsprechend ausgelegte Leitungssysteme benötigt werden. Zweikanalige Systeme lassen sich in der Regel besser an die Erfordernisse der Bearbeitung anpassen, da Luftdruck, Fluidmenge und Manteldruck getrennt voneinander einstellbar sind.

Derzeit werden weltweit ca. 10.000 Langdrehmaschinen pro Jahr verkauft. In Deutschland sind zwischen 40 und 50 tausend Langdrehmaschinen im Einsatz. Aus Gründen der Prozesssicherheit sowie zur Erlangung der geforderten hohen Bauteilqualität werden Langdrehmaschinen in der Regel mit mineralölbasierten Kühlschmierstoffen (KSS) betrieben. Der in der Langdrehmaschine umlaufende Kühlschmierstoff reichert sich mit Werkstückstoff- und Schmutzpartikeln sowie mit Fremdölen bspw. aus der Hydraulikanlage oder aus der Zentralschmieranlage an. Diese Fremdstoffe können nicht ausgefiltert werden, so dass sich die Qualität des KSS zunehmend verschlechtert und damit das Medium regelrecht verschlissen wird und periodisch komplett ersetzt werden muss. In der Literatur finden sich Angaben, dass ca. 13% des Gewichts der abtransportierten Späne auf ausgeschleppte Kühlschmiermedien entfallen, die einem Stoffrecycling verloren, gehen /10/. Das Problem der Ausschleppung wird aus Gründen des Arbeits- und Umweltschutzes auch in Informationsschriften von Verbänden und Unfallversicherungen thematisiert /11/, /12/. Durch Brikettierung kann dieser Anteil zwar vermindert werden, der Einsatz der erforderlichen leistungsstarken Pressen verbraucht jedoch seinerseits elektrische Energie. Gemäß den Angaben von Anwendern ist durch Verschleiß und Ausschleppung mit einem Aufwand von typischerweise ca. 700 l Kühlschmierstoff pro Maschine und Jahr zu rechnen. Damit gilt diese Prozessflüssigkeit als Verbrauchsmaterial. Bezogen auf die derzeit in Deutschland eingesetzten Langdrehmaschinen ergibt sich somit ein Verlust an Schmiermedien von 28-35 Mio. Liter pro Jahr. Das dazu berechnete CO<sub>2</sub>-Äquivalent (bei Schmiermedien üblicherweise auf Schweröl bezogen) beträgt nach Inas 0,326 kg/KWh /13/. Könnte die aufgewandte Menge eingespart werden, dann ergäbe sich eine CO<sub>2</sub>-Reduzierung von 90.000-113.000 Tonnen. Weitere CO<sub>2</sub>-Einsparpotenziale lassen sich durch den Wegfall des Kühlschmieraggregats als Stromverbraucher an der Maschine erschließen. Damit würden in der Strombilanz bzw. CO<sub>2</sub>-Bilanz des Langdrehprozesses weitere 11,2% CO<sub>2</sub> eingespart.

Der überwiegende Anteil der bisher durchgeführten Umstellungen auf Minimalmengenschmierung erfolgte allein für das spanabhebende Verfahren Fräsen im Umfeld der Automobilindustrie sowie bei einzelnen großen Anwendern anderer Branchen. Gründe für die

bisher verhaltene Verbreitung des alternativen (Kühl-)Schmierkonzepts wurden in einer 2016 vom Umweltministerium des Landes Baden-Württemberg und vom Institut für Werkzeugmaschinen (IfW) der Universität Stuttgart durchgeführten Konzeptstudie identifiziert /14/. Anwendungen in dem weit verbreiteten Anwendungsfeld Langdrehen sind bisher nicht bekannt.

Folgende Arbeitspunkte wurden für das Projekt festgelegt:

AP1) Recherche

AP2) Vorbereitung des maschinellen Umfelds

AP3) Voruntersuchungen

AP4) Entwicklung einer MMS-geeigneten Langdrehmaschine

AP5) Auslegung MMS-geeigneter Bearbeitungsprozesse

AP 6) Zusammenführung von Maschine und Prozess sowie Testläufe

AP 7) Abschlussbericht

### 3. Hauptteil

Innerhalb dieses Kapitels werden die Vorhabensdurchführung und die erzielten Ergebnisse detailliert beschrieben und diskutiert. Der aktuelle Stand der Technik in Bezug auf die Technologie der Minimalmengenschmierung (MMS) bei der spanabhebenden Bearbeitung ergab gegenüber dem Antragsstand keine neuen Aspekte. Insbesondere bei der Drehbearbeitung auf Langdrehautomaten hat sich der Kenntnisstand seit der Antragsstellung nicht verändert. Aus der Literatur sind keinerlei Untersuchungen und Forschungsarbeiten bekannt, die sich mit der Umstellung von Langdrehprozessen auf Minimalmengenschmierung und den damit verbundenen Einsparpotenzialen an mineralölbasierten Kühlschmierstoffen befassen.

Im Rahmen des Projekts wurde ein Referenzteil als repräsentatives Bauteil für alle weiteren Untersuchungen definiert (Abb. 1). Dieses Referenzteil beinhaltet alle in der Serienfertigung gängigen Zerspan-Operationen wie Längs- und Plandrehen, Fräsen, Bohren, Gewinden, Abstechen.

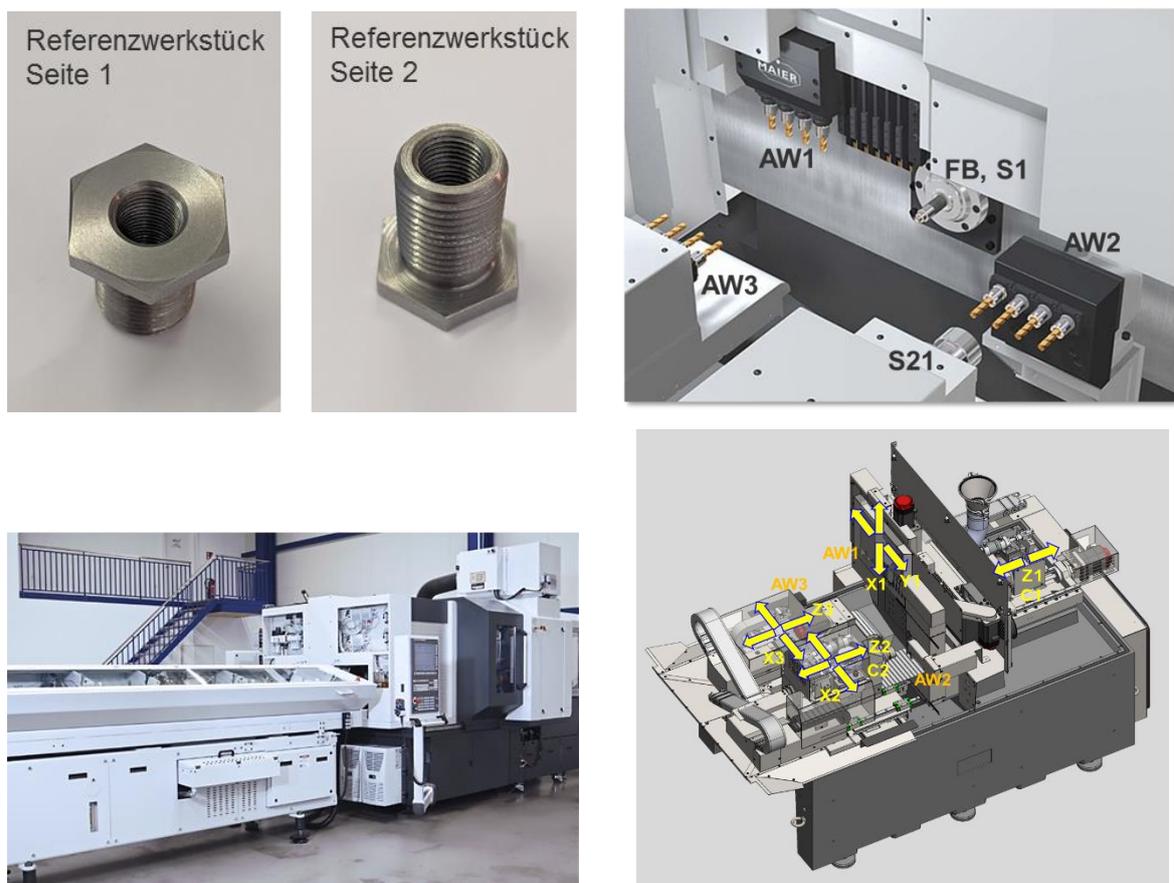


Abbildung 1: Referenzwerkstück und Versuchsträger Langdrehmaschine Maier F4

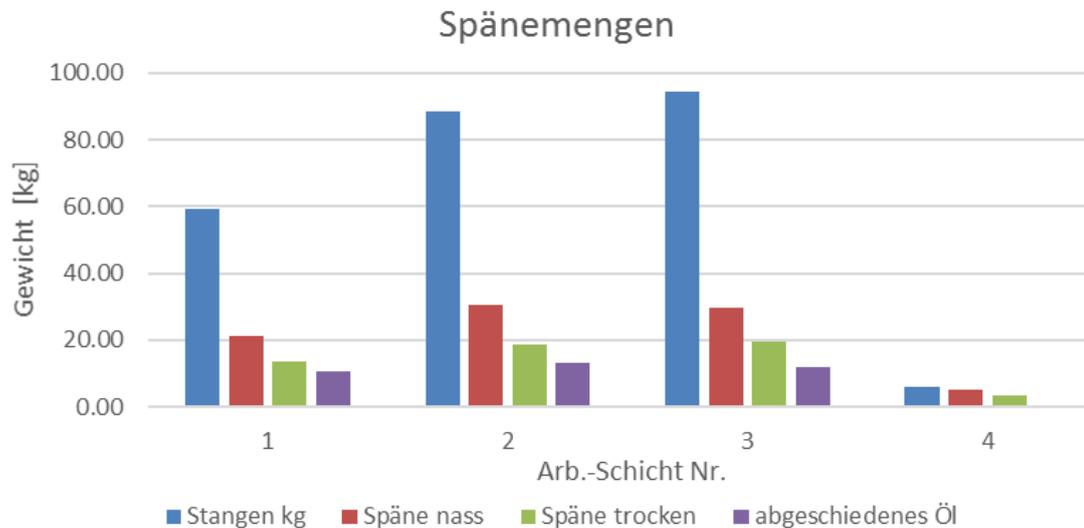
Beim Anwendungspartner HAZEC wurden produktionsbegleitende Untersuchungen zum tatsächlichen Schneidölverbrauch (separiert nach Ausschleppung, Pflege, Ersatz) bei einer typischen Großserienfertigung durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgten auf einer Langdrehmaschine Maier Typ F4, welche mit einer Gegenspindel und einem in X und Z beweglichen Bearbeitungskopf mit angetriebenen Werkzeugen sowie einem feststehenden Bearbeitungskopf mit angetriebenen Werkzeugen ausgerüstet ist. Abbildung 2 zeigt den Arbeitsraum der Maschine bei der Serienfertigung des Referenzwerkstücks. Die Bilder zeigen, dass nahezu alle Oberflächen im Arbeitsraum ölüberflutet bzw. ölbenetzt sind. Eindrücklich erkennbar ist zudem die Problematik, dass sich bei bestimmten Prozessoperationen längere Wirr- und Wendespäne bilden, die an den Maschinenkomponenten hängen bleiben und den ungestörten Spänefall behindern. Spänenester und -knäuel bilden sich bevorzugt an der Hauptspindel-Führungsbuchse, auf ebenen Flächen und an vorstehenden Ecken und Kanten von Verkleidungsblechen.



**Abbildung 2: Späneansammlungen (sog. „Spänenester“) bei Überflutungskühlung, nahezu alle Oberflächen des Arbeitsraums sind ölbenetzt**

Die Bilanzierung der Ölausschleppung über die angefallenen Spänemengen (Abb. 3) zeigt, dass der Gesamtverlust an Schneidöl in Bezug auf das eingesetzte und zerspannte Rohmaterial erheblich ist. Der Rest-Brennwert des während 4 Arbeitsschichten (32 h) ausgeschleppten, verschlissenen und zu entsorgenden Öls beträgt 352,80 kWh und entspricht einem CO<sub>2</sub>-Äquivalentausstoss von 112,20 kg. Umgerechnet auf die Betriebsstunde entspricht dies 11 kWh/h bzw. 3,5 kg/h CO<sub>2</sub> und pro gefertigtem Werkstück im Mittel 0,62 kWh bzw. 0,2 kg CO<sub>2</sub>. Dabei handelt es sich lediglich um die zu entsorgenden Öl-Abfälle, der elektrische Energieverbrauch ist hier noch gar nicht eingerechnet. Zum Vergleich: ein PKW

mit Ottoantrieb und einem Durchschnittsverbrauch von 6 l/100km stößt ca. 0,24 kg CO<sub>2</sub> pro gefahrenem Kilometer aus.



**Abbildung 3: Bilanzierung der Stoffströme**

Bisher nicht erkannte Bereiche, in denen es zum Austrag von Kühlschmierstoff aus dem Kreislauf kommt, sind ebene Flächen auf der Maschinenstruktur - auch außerhalb des eigentlichen Arbeitsraumes - auf denen sich Öl ansammelt und mit der Zeit verloren geht (z.B. auf hauptspindelseitigen Gestell-Flächen hinter der Führungsbuchse). Dieser Ölverlust ist verursacht durch Kompromisse, die bei der konstruktiven Gestaltung von Gestell und Schlitzenbaugruppen eingegangen werden mussten und durch Sickerströme und Undichtigkeiten an Abdeckungen. Bei einer Umstellung auf Minimalmengenschmierung kann dieser komplett vermieden werden, da die Überflutung kritischer Bereiche wegfällt.

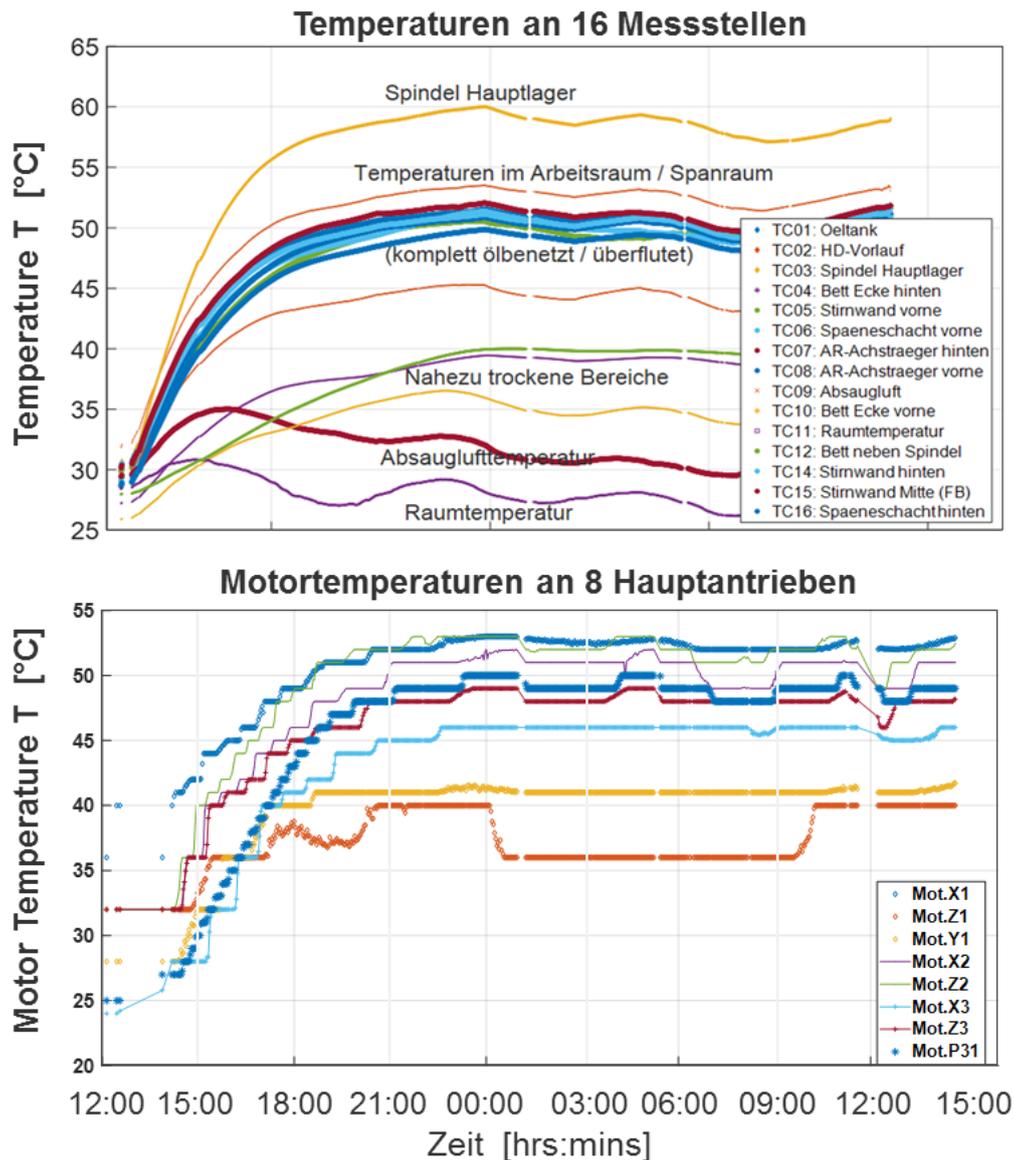
Die Langdrehmaschine Maier Typ F4 wurde zur Erfassung und Bewertung von thermischen, elektrischen und mechanischen Lasten mit umfangreicher Messtechnik (Abb. 4) zur Erfassung von Temperaturen, Volumenströmen, Antriebsleistungen, Energie- und Medienverbräuchen sowie zusätzlich mit Dehnmessstreifen zur Erfassung von thermisch bedingten Gestell-Dehnungen ausgestattet und Zerspanungsuntersuchungen mit konventioneller Serien-Überflutungskühlschmierung durchgeführt.



**Abbildung 4: Messtechnische Ausstattung (Beispielbilder)**

Die durchgeführten Messungen zeigen ein sehr träges thermisches Verhalten der Maschine. Die Verläufe der Temperaturen an den einzelnen Messstellen weisen einen typischen Anstieg zu Fertigungsbeginn auf, der mit der Zeit langsamer wird und nach etwa 8 Stunden in einen thermischen stabilen Beharrungszustand mündet (Abb. 5 und 6). Die Antriebe erreichen nach dieser Zeit ebenfalls einen quasi-stationären Zustand. Die wenigen trockenen Messstellen sowie die Absauglufttemperatur sind stärker an die Raumtemperatur in der Fertigungshalle gekoppelt und korrelieren mit dieser. Die übrigen Temperaturen in der Maschine korrelieren nicht mit der Raumtemperatur.

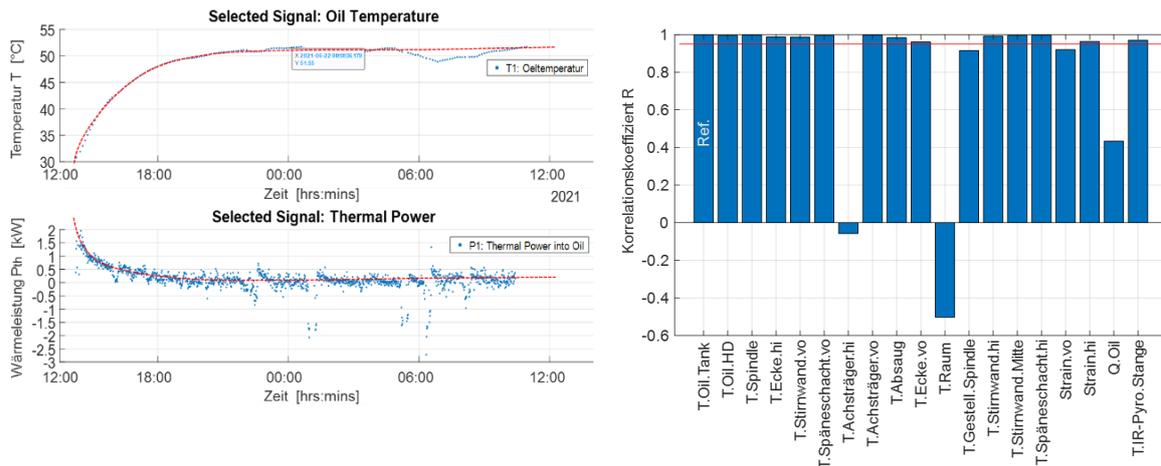
Es zeigt sich, dass eine starke Korrelation fast aller Temperatur-Messstellen und der Dehnungen an der Maschinenstruktur zur Öl-(Vorlauf)-Temperatur gegeben ist (siehe Abb. 6).



**Abbildung 5: Temperaturverläufe an diversen Maschinen-Messstellen und Antrieben**

Dies deutet darauf hin, dass der Temperaturhaushalt der Maschine nahezu ausschließlich durch die Wärme im Schneidöl bestimmt wird und infolge einer guten Benetzung und Überflutung vieler Gestellbereiche relativ homogen ist. Lediglich einzelne wenige Stellen, die keine direkte Überflutung erfahren, korrelieren schwächer mit der Öltemperatur.

An diesen trockenen Stellen ist der Wärmeeintrag durch Verlustleistungen von Vorschubantrieben und Vorschubsystemen bestimmt, die in deren unmittelbarer Umgebung angeordnet sind. Die Temperatur an diesen Stellen korreliert besser mit den Temperaturen der dort gelegenen Antriebe. Der Gesamt-Wärmeeintrag in das Öl setzt sich zusammen aus der Zerspanungswärme, den Drosselverlusten der Hochdruckpumpeneinheit und aus Anteilen der Wärmeverluste von Haupt- und Nebenantrieben.



**Abbildung 6: Korrelationen unterschiedlicher Temperatur-Messstellen zur Öltemperatur**

An die Aufheizkurve des Öls lässt sich mittels eines Curve-Fits mit guter Güte eine Exponentialfunktion für den Temperaturverlauf anlegen. Aus dieser ergibt sich ein initialer prozessbedingter Wärmeeintrag in das Öl von ca. 2 kW. Im thermischen Gleichgewicht ist diese thermische Leistung von 2 kW über die Rückkühlaggregate permanent abzuführen. Der Energieverbrauch der Rückkühlaggregate beträgt hierfür etwa 6 kW. Dies entspricht einem CO<sub>2</sub>-Äquivalent (CO<sub>2</sub>e) von  $6 \cdot 428 \text{ g/kWh} = 2.568 \text{ kg/kWh}$  (CO<sub>2</sub>e Stand 2021). Berücksichtigt man zusätzlich die Vorketten-Emissionen der Stromerzeugung, ergeben sich nur für die Ölkühlung Treibhausgas-Emissionen in Höhe von 2.910 g/kWh CO<sub>2</sub>e (entspricht im Mittel 116 g CO<sub>2</sub> pro gefertigtem Werkstück).

Am IfW wurde eine Simulationsumgebung (Abb. 7) aufgebaut, die es ermöglicht, den Thermohaushalt des Versuchsträgers unter Prozessbedingungen näherungsweise zu simulieren. Mithilfe der Prognose des Wärmeeintrags in die Maschinenstruktur als Eingangsgröße kann sodann mit einem einfachen FEM-Modell das Verlagerungsverhalten der Maschine – insbesondere an der Zerspanstelle - berechnet werden. Es können verschiedene Kühlschmierstrategien untersucht werden und geeignete konstruktive Optimierungen und Maßnahmen abgeleitet und in ihrer Wirkung beurteilt werden.

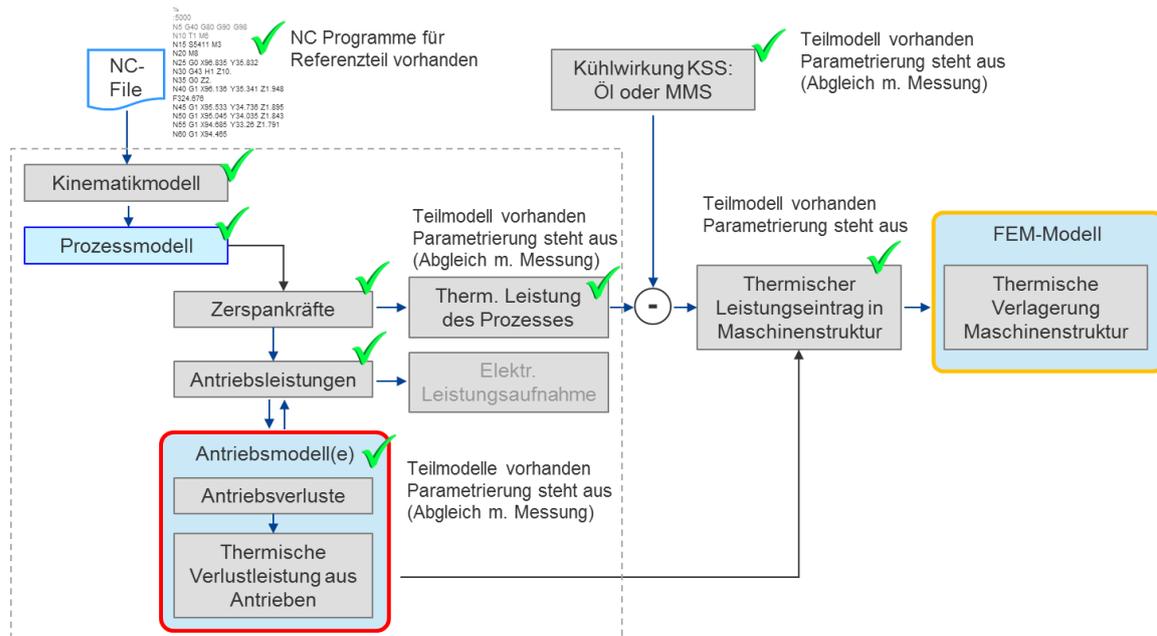


Abbildung 7: Simulationsumgebung zum Thermohaushalt des Versuchsträgers

Zur näherungsweise Vorhersage der erzeugten Prozess-Wärmeleistung in Abhängigkeit der momentanen Zerspanbedingungen werden die von Tönshoff et al /15/ postulierten empirisch-analytischen Zusammenhänge (Abb. 8) herangezogen. Diese ermöglichen eine Abschätzung der Aufteilung der Prozess-Abwärmeleistung auf Späne, Werkzeug und Werkstück unter Trockenbearbeitungsbedingungen.

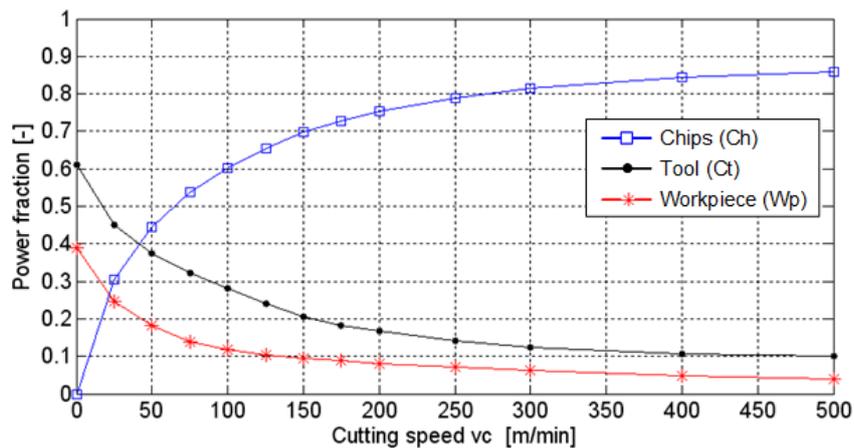


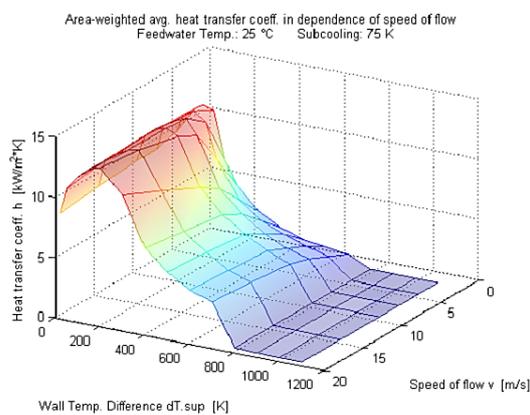
Abbildung 8: Modell der Aufteilung der Prozess-Wärmeleistung auf Späne, Werkzeug und Werkstück unter Trockenbedingungen (Tönshoff et al /15/)

Durch Zufuhr von KSS - sei es in Form von Strahlkühlung (Überflutungskühlung) oder MMS - findet ein Wärmeübergang auf diesen statt und eine entsprechende Kühlwirkung auf Späne, Werkzeug und Werkstück tritt ein. Innerhalb der Simulationsumgebung wird zur Mo-

dellbeschreibung dieser Kühlwirkung durch den KSS der sog. Kühlfähigkeitsindex K herangezogen [16]. Er beschreibt das Verhältnis zwischen der durch den KSS/MMS abgeführten Wärme und der gesamten erzeugten Wärme bei der Zerspanung. Dessen Bestimmung erfolgt experimentell aus Aufheiz- und Abkühlkurven bei KSS-Zufuhr und unter Trockenbedingungen. (Abb. 9)

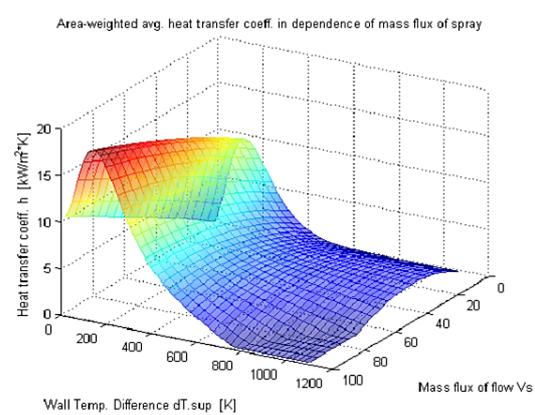
$$K = \frac{\int_{t_0}^{t_{exp}} \dot{Q}_{dry}(t) dt - \int_{t_0}^{t_{exp}} \dot{Q}_{cooled}(t) dt}{\int_{t_0}^{t_{exp}} (\dot{Q}_{dry}(t) - \dot{Q}_0) dt} \quad 0 \leq K \leq 1$$

### Wasserstrahlkühlung (Jet-Cooling, Düsen-Freistrah, Prallstrahl)



Karwa, N.: *Experimentelle Untersuchung der Prallkühlung von heißen Stahlplatten mittels Wasserstrahlen*. Diss., TTD, TU Darmstadt, 2012

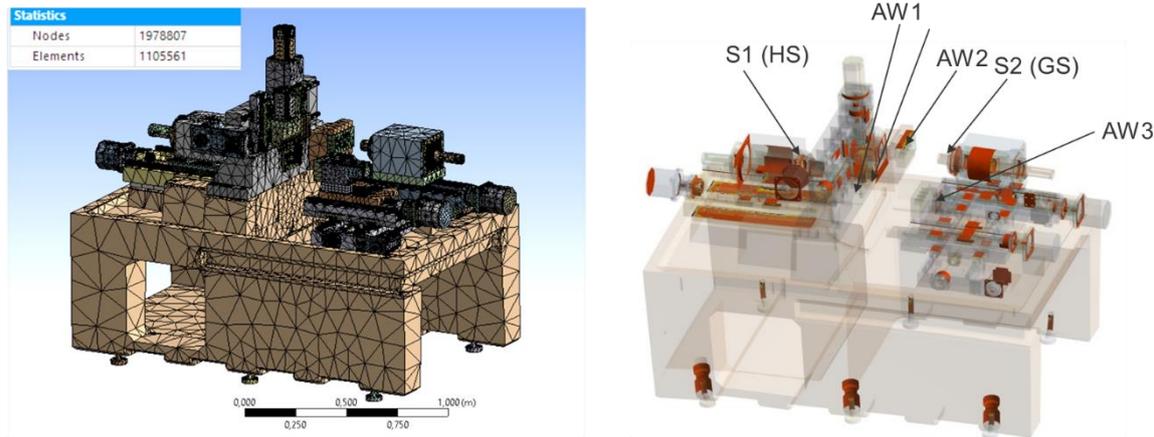
### Sprühnebelkühlung (Spray-Cooling, MMS)



Viscorova, R.: *Untersuchung des Wärmeübergangs bei der Spritzwasserkühlung unter Berücksichtigung des Einflusses der Verzunderung*. Diss., TU Clausthal, 2007.

**Abbildung 9: Wärmeübergangskoeffizienten bei Strahl- und bei Sprühkühlung nach [17, 18]**

Um eine näherungsweise Abschätzung geben zu können, ob und in welchem Umfang die Umstellung auf MSS-Schmierung Auswirkungen auf den Thermohaushalt und die thermischen Verlagerungen an den Zerspanstellen der Maschine hat, wurde ein vereinfachtes thermisches Model in der Finite-Elemente-Software ANSYS aufgesetzt. Als geometrische Ausgangsbasis diente dabei die bisherige Konstruktion der F4, deren CAD-Modell nach entsprechender Aufbereitung in ANSYS importiert und vernetzt wurde. Für die thermischen FEM-Simulationen des Maschinensystems wurden die thermischen Randbedingungen aus den vorliegenden Messergebnissen und Teilergebnissen aus der Simulationsumgebung abgeleitet. Sämtliche thermischen Kenngrößen wie Wärmeleitung (innerhalb von Strukturteilen), Konvektion (an freien benetzten und unbenetzten Bauteiloberflächen) und Wärmestrahlung wurden auf Basis des Stands der Technik für vergleichbare Maschinenstrukturen parametrisiert. (Abb. 10)



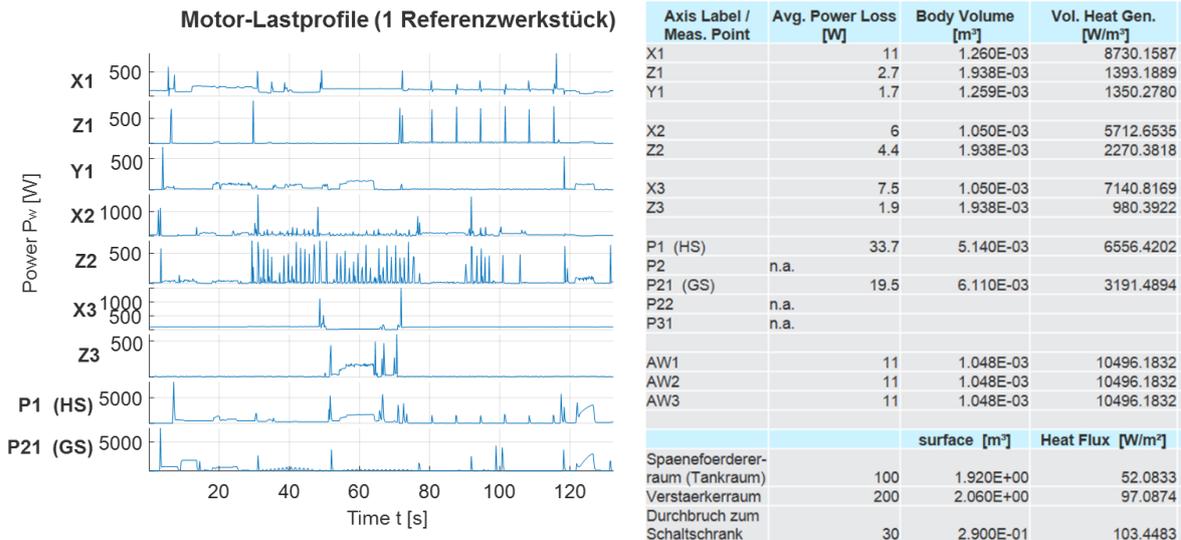
**Abbildung 10:** links: FEM-Modell für die thermische Simulation, rechts: Baugruppenzeichnung und thermische Kontakte zwischen Baugruppen/-teilen

Gemäß ihrem Benetzungsgrad mit Öl und den mittleren Strömungsbedingungen an den Oberflächen wurden mittlere Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  (in  $W/(m^2 \cdot K)$ ) an den Grenzflächen mit Werten zwischen 3 und 500  $W/(m^2 \cdot K)$  parametrisiert. Der resultierende Wärmefluss ergibt sich dabei zu:

$$\dot{q} = \alpha \cdot \Delta T = \alpha \cdot (T_{Wand} - T_{Fluid})$$

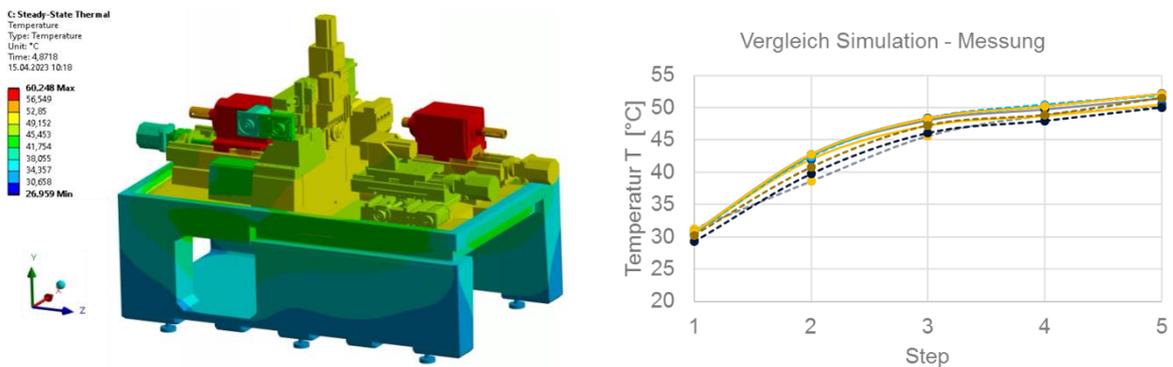
An den mit Öl benetzten Flächen wurde zwischen voll überfluteten Flächen und teilbenetzten Oberflächen abgestuft unterschiedlich parametrisiert (teilbenetzte Flächen erhalten 50% des  $\alpha$ -Werts der Konvektion gegenüber vollbenetzten Flächen). Die Werte für die Wärmeleitung sowie die thermischen Ausdehnungskoeffizienten wurden entsprechend den Materialdaten von Stahl, Kupfer, Aluminium und Polymerbeton (Marke „EPUMENT“) entnommen.

Es wurden zwei unterschiedliche Simulationssetups berechnet: Für Setup A wurden als Randbedingungen die bekannten Temperaturen an allen Messstellen gewählt. Das Anfahren aus dem Ruhezustand wurde in 5 Steps bis zum thermisch stationären Zustand simuliert. Für das Berechnungs-Setup B wurden die instationären Lastgänge an den Hauptantrieben (siehe Abb. 11) unter Einbeziehung des jeweiligen Motorwirkungsgrades umgerechnet und reduziert auf die mittleren anfallenden thermischen Verlustleistungen in den Antrieben. Diese mittleren Verlustwärmeleistungen wurden dann den korrespondierenden FEM-Modellteilen zugewiesen. Auch bei Setup B wurde das Anfahren aus dem Ruhezustand in 5 Steps bis zum thermisch stationären Zustand simuliert.



**Abbildung 11: Lastprofile an den Hauptantrieben des Versuchsträgers bei der Referenzbearbeitung**

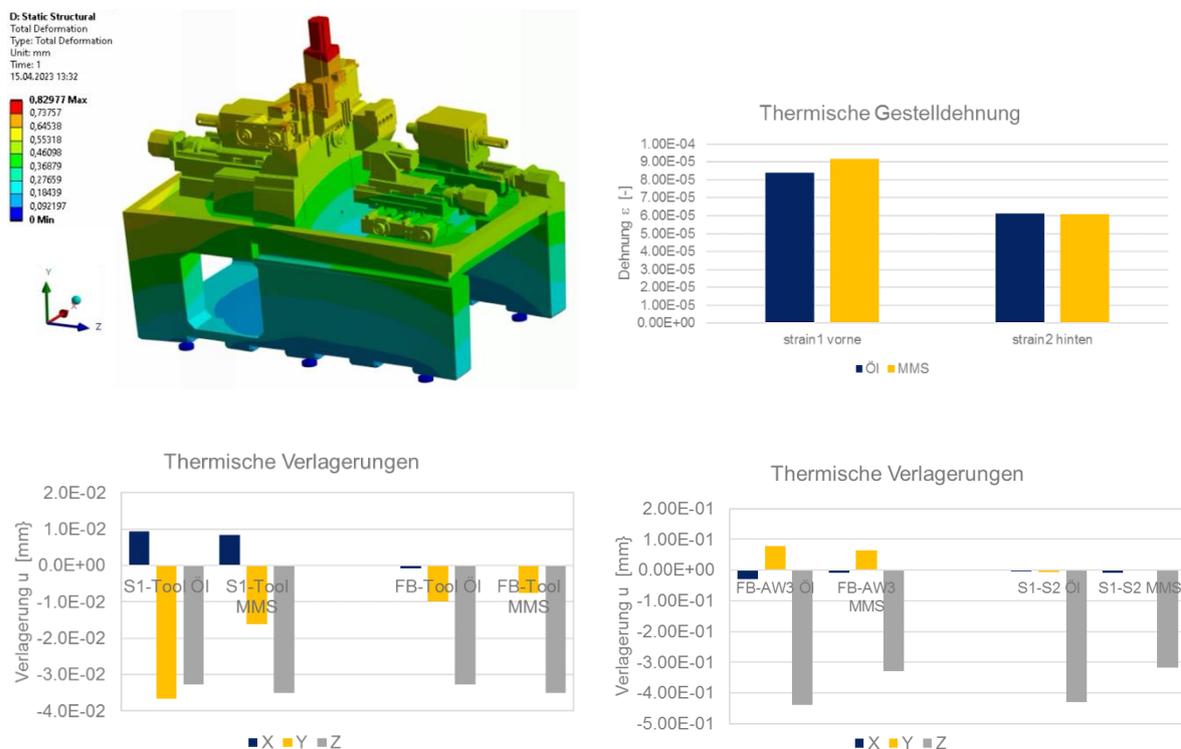
Setup B diente dazu, die Genauigkeit des FEM-Modellansatzes anhand der Messungen abzugleichen und zu verifizieren, indem die simulierten Temperaturen an den Temperatursensorpositionen mit den realen Messwerten verglichen wurden. Die Übereinstimmung ist zufriedenstellend, so dass dem thermischen FEM-Modell eine grundlegende Glaubwürdigkeit bestätigt werden darf. (Siehe Abb. 12)



**Abbildung 12: Thermisches FEM-Modell des Versuchsträgers und Vergleich von Modellergebnissen und Messungen (exemplarisch)**

Für die Simulationen unter MMS-Bedingungen wurde ausgehend von Setup B der konvektive Wärmeübergang der vormals ölbenetzten Oberflächen auf einen (geschätzten) Anteil von 10% reduziert, was einerseits die reduzierte Konvektion an freier Luft widerspiegelt, andererseits den reduzierten Wärmeeintrag nur kurzzeitig anprallender bzw. abprallender heißer Späne annähert. Die Parametrierung erfolgte anhand Erfahrungswerten. Dem IfW ist bewusst, dass mit diesen Annahmen eine erhöhte Unsicherheit einhergeht. Die resultierenden Verlagerungen zwischen den bearbeitungsrelevanten Maschinenbauteilen

(Hauptspindel „S1“, Gegenspindel „S2“, Führungsbuchse „FB“, Hauptwerkzeugträger „Tool“ und angetriebene Werkzeugträger „AW3“) wurden anschließend ausgewertet und für „Öl-Überflutungskühlung“ und „MMS-Bedingungen“ gegenübergestellt. (Siehe Abb. 13)



**Abbildung 13: Simulierte thermische Verformungen des Versuchsträgers, Vergleich von Ergebnissen bei konventioneller Öl-Überflutungskühlung und MMS-Kühlung**

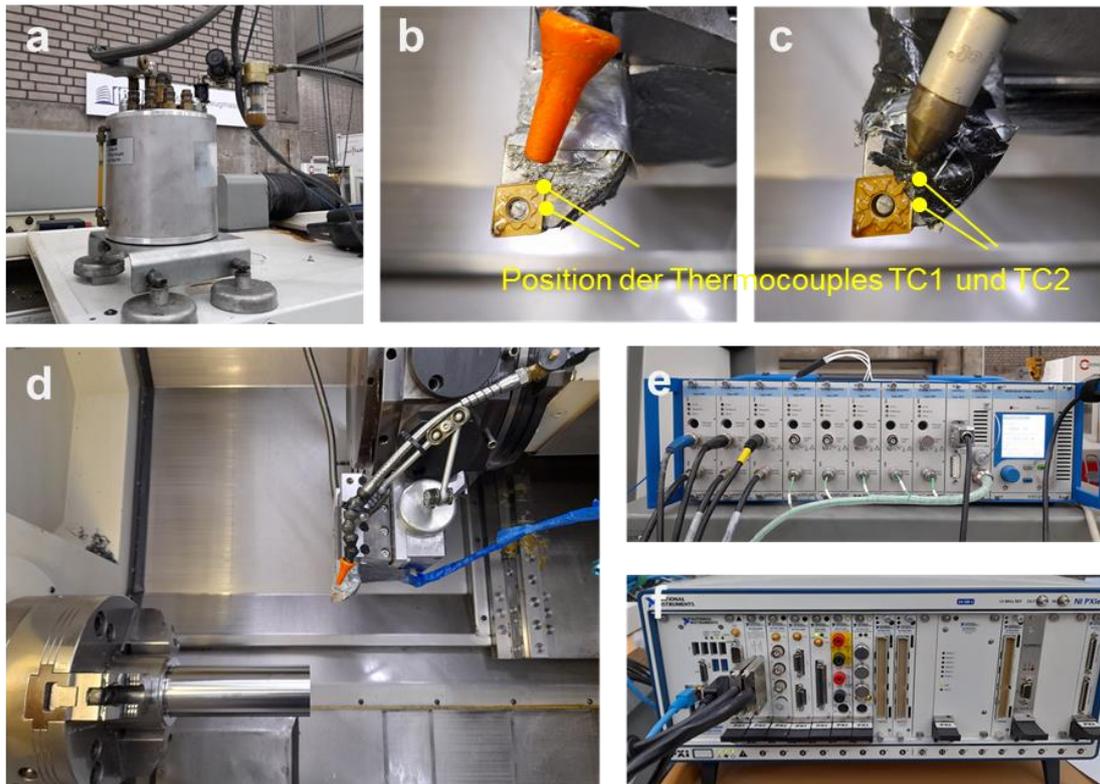
Die Simulationsergebnisse zeigen, dass durch die Umstellung auf MMS-Kühlung der thermische Haushalt nicht leidet und die zu erwartenden thermisch bedingten Relativverlagerungen zwischen den bearbeitungsrelevanten Maschinenbaugruppen an den jeweiligen Bearbeitungsstellen nicht massiv ungünstig beeinflusst werden. Teilweise sind sogar geringere thermische Verlagerungen zu erwarten (bspw. in radialer Richtung an der Hauptzerspanstelle oder bei Bearbeitung mit den angetriebenen Werkzeugen AW3). Die Temperaturgradienten innerhalb der Maschine werden unter MMS-Bedingungen v.a. im unteren Gestellbereich etwas größer als unter Ölkühlung, da die homogene, ausgleichende Temperierung durch die Benetzung mit dem Öl entfällt. Ziel sollte es hier sein, durch Designanpassungen Wärmeflüsse von heißeren antriebsnahen Zonen in kühlere Zonen zu unterbinden und den längeren direkten Kontakt heißer Späne mit den Gestelloberflächen zu vermeiden. Ein MMS-gerechtes Gestelldesign sollte thermische Dehnungen zwischen Zerspanstellen wichtigen Baugruppen minimieren, indem Anbindungsflächen für die Achsen bzw. Achsträ-

ger möglichst zentrumsnah um die Führungsbuchse bzw. die Haupt-Zerspanstellen angeordnet werden und unvermeidliche thermische Dehnungen thermosymmetrisch aufgefangen werden.

Um die Fa. Maier Machines bei der Auslegung MMS-geeigneter Bearbeitungsprozesse für das Langdrehen zu unterstützen, wurden am IfW Zerspanuntersuchungen unter Trockenbedingungen, Öl-Überflutungskühlung und unter MMS-Bedingungen an den Drehoperationen Außen-Längsdrehen, Plandrehen und Ein-/Abstechen durchgeführt. Von besonderem Interesse waren die bei unterschiedlichen Technologieparametern resultierenden Schnittkräfte, die resultierenden Spanformen und insbesondere das thermische Verhalten bei der Spanbildung.

Hierzu wurden an einer Versuchsmaschine Typ „Gildemeister CTX 420 linear“ mit 28 kW Hauptspindelleistung experimentelle Versuchsreihen durchgeführt.

Die verwendete Sensorik umfasst neben einem KISTLER Dynamometer Typ 9121 mehrere Temperaturmessstellen mit Thermoelementen Typ K in Schneidennähe und im Arbeitsraum sowie eine Variotec Thermografiekamera der Fa. InfraTec. Die Werkstücktemperaturen wurden thermografisch und kurz nach der Bearbeitung per aufgeklebten Thermoelement gemessen. Erfasst wurden die Messwerte mit einem PXI-Messsystem der Fa. National Instruments. Als MMS-Dosiersystem kam ein Zweikanalsystem HPM MicroJet zum Einsatz, das mit zwei verschiedenen Düsensystemen betrieben wurde (b und c in Abb. 14).



**Abbildung 14: Versuchsaufbau in Gildemeister CTX 420 linear: a: HPM MMS-Dosiersystem, b: Düse 1, c: Mischkopf Düse 2, d: Arbeitsraum mit Werkstück, e: KISTLER 8-kanal Ladungsverstärker für Dynamometer, f: National Instruments PXI Datenerfassung**

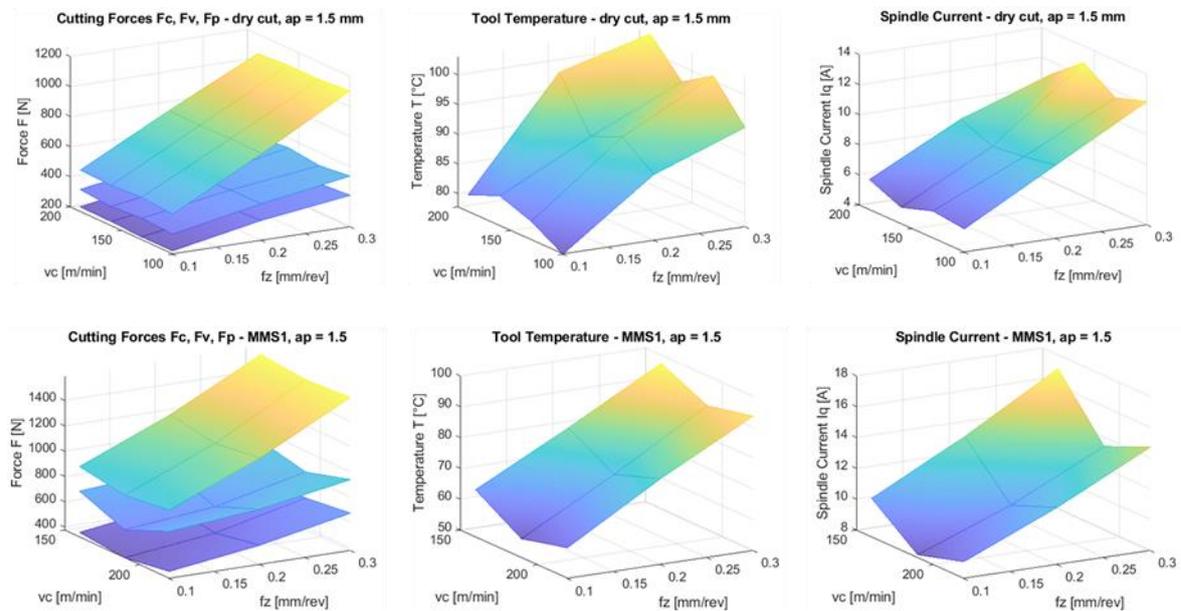
Als Werkstückwerkstoff kam ein gängiger Stahl 42CrMo4 (1.7225) mit Ausgangsdurchmesser 68 mm zum Einsatz. Es wurden hartmetallbeschichtete Wendeschneidplattenwerkzeuge mit MMS-geeigneter Geometrie und Beschichtung verwendet. (Garant 250754 HB7025 mit 0,2 und 0,5 mm Schneidenradius, Hartmann TN200 CNMG 120408-49 sowie ein Einstechwerkzeug der Fa. Garant mit 2,8 mm Breite).

Nach Vorversuchen wurden die Schnittparameter für das Längsdrehen wie folgt definiert:

- Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  in Stufen von 130, 160, 190 und 220 m/min
- Vorschub in Stufen von 0,1; 0,2 und 0,3 mm/Umdrehung.
- Zustelltiefen  $a_p$  (reale Spandicken) in Stufen von 0,5; 1,0; 1,5 und 2,0 mm

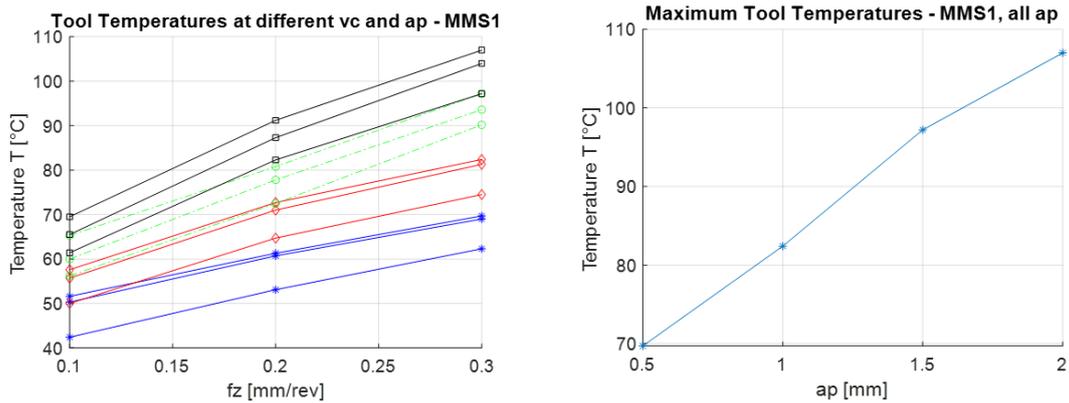
Nicht alle möglichen Kombinationen aus dem obigen Parameterfeld führten zu praxisgerechten, akzeptablen Spanformen, Oberflächengüten und Verschleißwerten. Insbesondere das Insert mit Schneidenradius von 0,5 mm erwies sich bei Spanungsdicken unter 1 mm als kritisch, da es zu hohem passivem Schnittdruck und starker Wirrspanbildung führte, die erhöhte Reibung führte zudem zu rascher Erhitzung unter Trocken- und MMS-Bedingungen

und zu raschem Verschleiß. Für das Plandrehen und Einstechen/Abstechen wurden praktikable Kombinationen aus dem obigen Parameterfeld untersucht, bei denen sich akzeptable Spanformen, Oberflächengüten und Verschleißwerte ergaben. (Siehe Abb. 15)

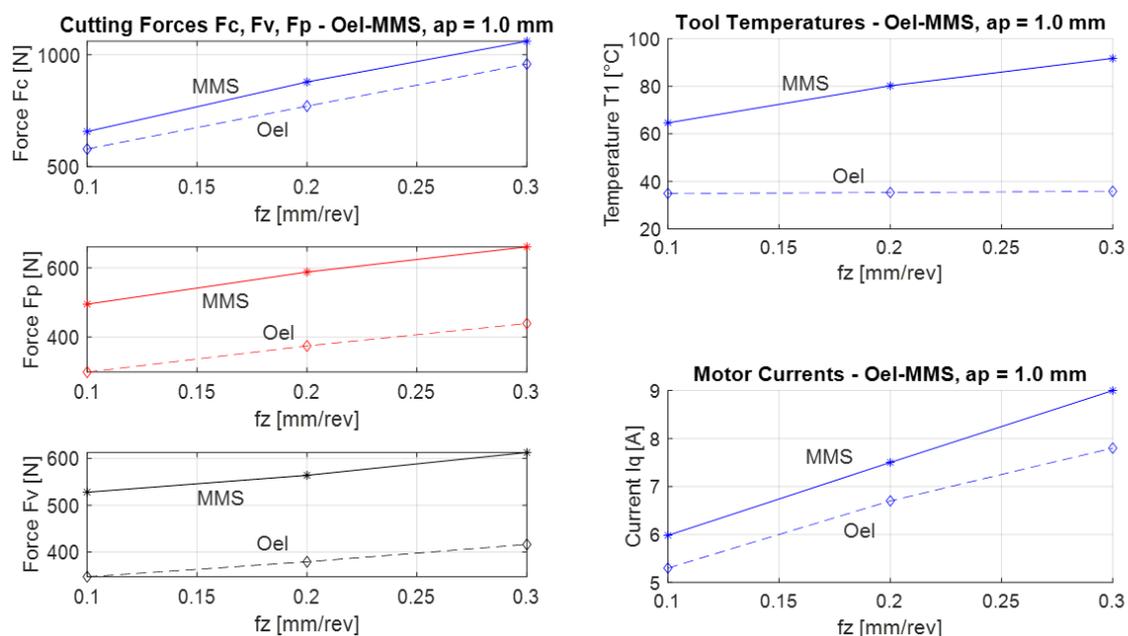


**Abbildung 15:** v.l.n.r. Schnittkräfte  $F_c$ ,  $F_p$  und  $F_v$ , Werkzeugtemperaturen  $T_1$  und Momentenbildender Strom-Istwert  $I_q$ ; obere Reihe: Trockenbearbeitung, untere Reihe: Bearbeitung unter MMS-Bedingungen mit 90% MSS-Volumenstrom, beide exemplarisch für  $a_p = 1,5$  mm

Insgesamt eignen sich die Werkzeuge bei angepassten Schnittparametern gut für den Einsatz unter MMS-Bedingungen. Generell treten dabei wie erwartet höhere Temperaturen am Werkzeug als bei Überflutungskühlung auf (vgl. hierzu exemplarisch Abb. 17). Unter MMS-Bedingungen ist bei allen Operationen eine Abhängigkeit der werkzeugseitigen Temperaturentwicklung von der Zerspanleistung erkennbar, bei Überflutungskühlung ist die Werkzeugtemperatur weit weniger abhängig von der Schnittleistung. Die Oberflächengüte wies im Parameterbereich vergleichbare Eigenschaften auf wie unter Überflutung als auch unter Trockenbearbeitung (Abb. 16).



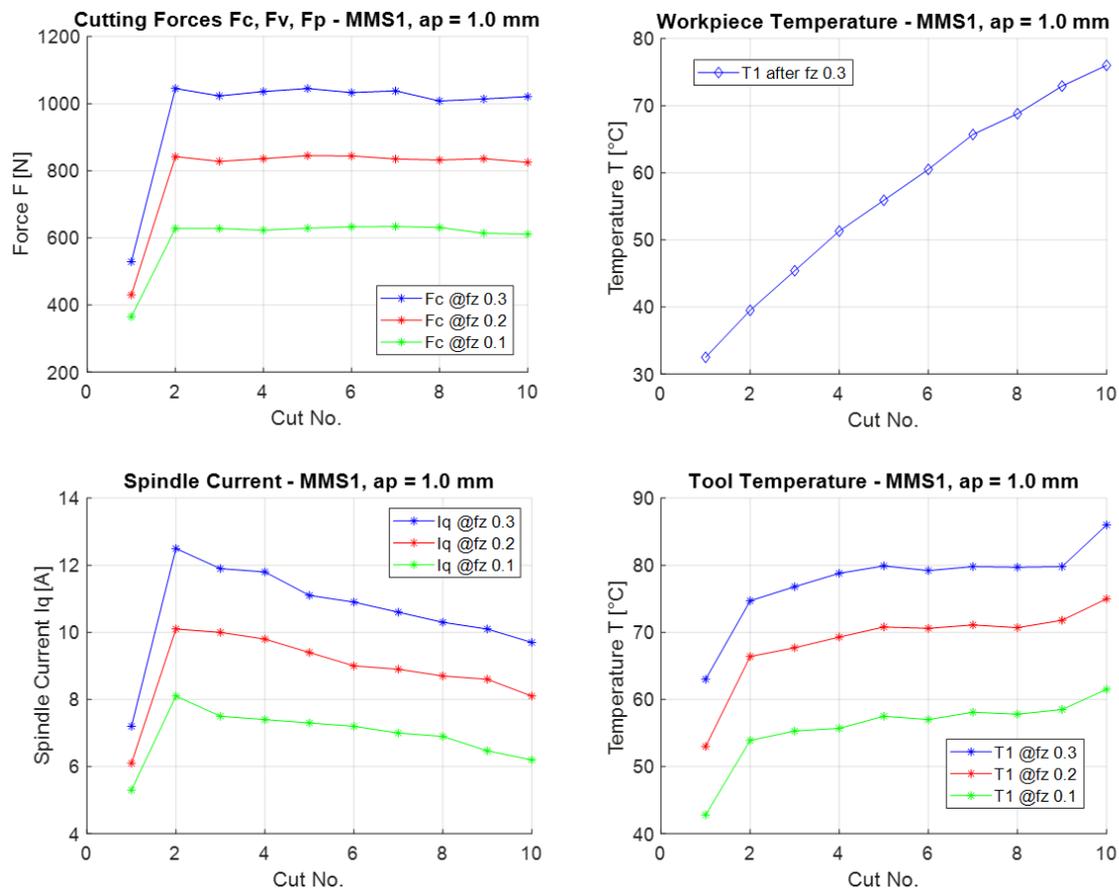
**Abbildung 16: Temperaturen am Werkzeughalter direkt neben der Wendeschneidplatte (Pos. siehe Abb. 14), links: bei unterschiedlichen Technologieparametern, rechts: maximal auftretende Temperatur bei verschiedenen Schnitttiefen (Spanlasten)**



**Abbildung 17: Vergleich der Verhältnisse unter Öl- bzw. MMS-Kühlschmierung.**

Bei einer Bearbeitungsabfolge unter MMS-Kühlschmierung (Abb. 18) pendeln sich die Schnittkräfte auf etwa konstantem Niveau ein (Abb. 18, o.li.). Die Werkstücktemperatur nimmt stetig zu bis auf etwa 76°C zu (Werkstückgewicht zu Beginn der Messsequenz:  $m_1 = 6,12$  kg, am Ende:  $m_2 = 3,99$  kg, Gesamtdauer:  $t = 1.800$  s). Die erreichte Werkstück-Endtemperatur (siehe Abb. 18 o. re.) deutet darauf hin, dass ein erheblicher Teil der Zerspanungswärme auf das Werkstück entfällt, welches unter MMS-Bedingungen weit weniger gekühlt wird. Die Kühlwirkung des MMS konzentriert sich im Wesentlichen auf die Schneide. Die Werkzeugtemperatur steigt nicht in dem Maße, wie es die Werkstücktemperatur tut. Der Momentenbildende Strom-Istwert  $I_q$  (Abb. 18u. li.) fällt als Folge des mit ab-

nehmenden Werkstückdurchmessers geringer werdenden Drehmoments bei gleichbleibender Zerspanungsleistung (durch die konstante Schnittgeschwindigkeit erhöht sich die Spindeldrehzahl von Zyklus zu Zyklus, die Spindellast bleibt deshalb in etwa gleich – nicht dargestellt).

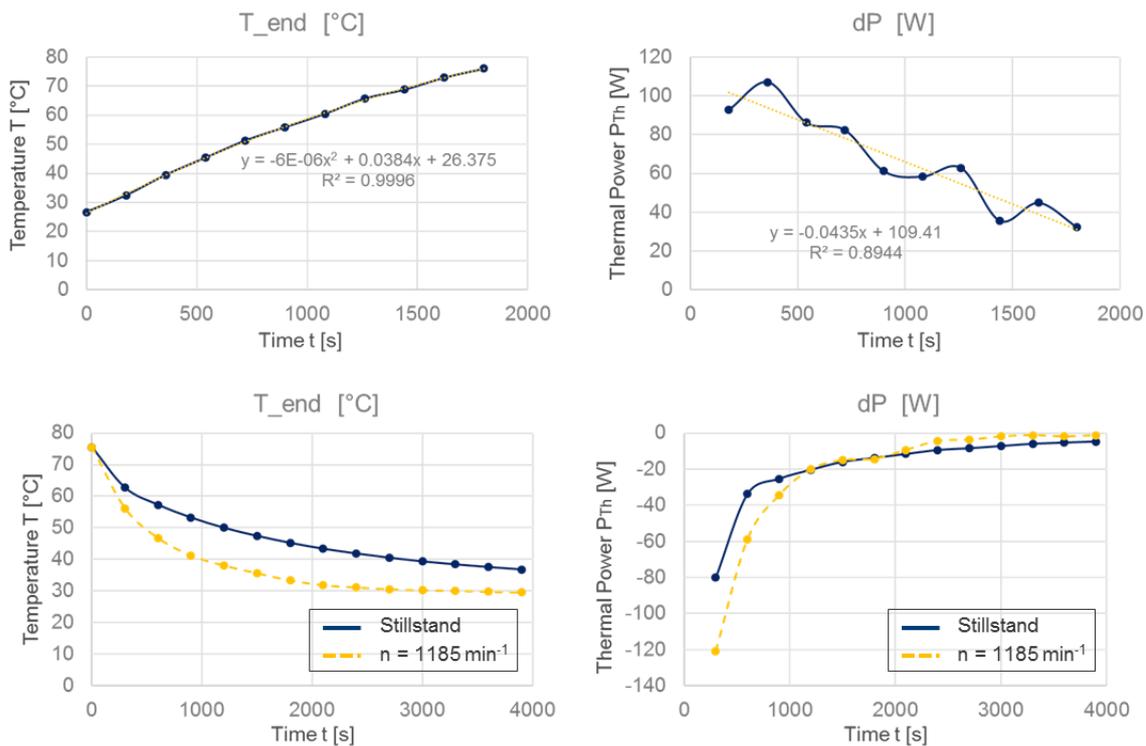


**Abbildung 18: Entwicklung der Schnittkräfte, Werkstück und Werkzeugtemperaturen und Spindelbelastung bei Erwärmung durch rasche Bearbeitungsabfolge**

Die bei MMS größtenteils entfallene Flüssigkeitskühlung der freien Werkstückoberfläche führt zu erhöhter Aufheizung des Werkstücks durch die Prozesswärme. Anhand der gemessenen Erwärmung des Werkstücks während einer Bearbeitungsabfolge (Abb. 19 o.li.) bei  $v_c = 190$  m/min und  $a_p = 1,0$  mm lässt sich mit der spezifischen Wärme des Werkstoffs  $1.7225$  von  $C = 470$  J/kgK und dem Temperaturgradienten ein angenäherter thermischer Netto-Leitungsfluss berechnen. Zu Beginn der Aufheizung beträgt dieser etwa 100 W und fällt dann ab auf ca. 40 W. Das thermische Gleichgewicht wird im Versuch nicht erreicht.

Demgegenüber steht ein negativer Leistungsfluss vom Werkstück hinaus in die Umgebungsluft des Arbeitsraums. Da das Werkstück während der Bearbeitung rotiert, ist mit forcierter erzwungener Konvektion an Luft zu rechnen. Es wurden in 5-minütigen Messintervallen sowohl die Abkühlkurve an freier Luft im Stillstand der Spindel als auch bei Rotation

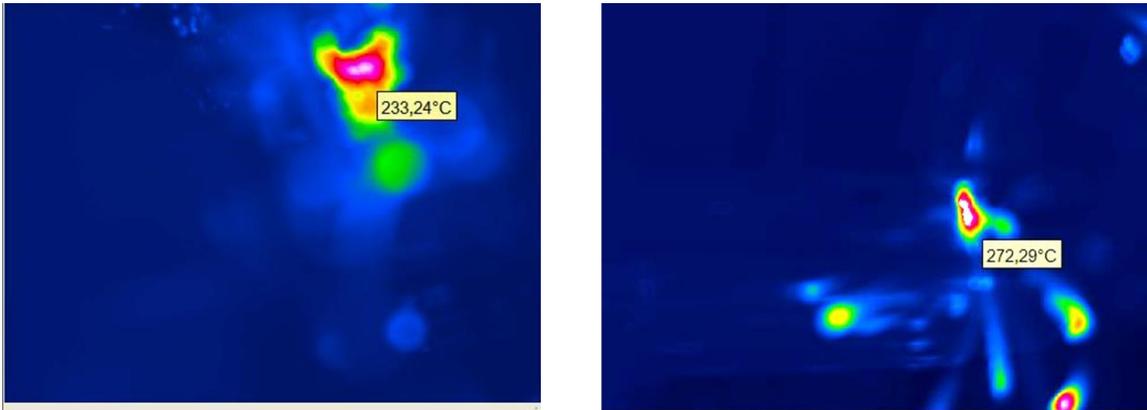
mit  $n = 1185 \text{ min}^{-1}$  erfasst. Abb. 19, untere Diagrammreihe, zeigt die beiden Abkühlkurven. Im Stillstand werden zu Anfang bei ca.  $78^\circ\text{C}$  Werkstücktemperatur  $80 \text{ W}$  Wärmeleistung an die Umgebung abgeführt. Bei rotierenden Werkstück sind es ca.  $120 \text{ W}$ . Die Kühlung des rotierenden Werkstücks fällt geringer aus als erwartet. Für den MMS-Langdrehprozess bedeutet dies, dass mit deutlich erhöhten Werkstücktemperaturen bei der MMS Bearbeitung zu rechnen ist.



**Abbildung 19: obere Reihe: Erwärmung durch rasche Bearbeitungsabfolge mit  $v_c = 190 \text{ m/min}$  und  $a_p = 1,0 \text{ mm}$ , untere Reihe: Abkühlung durch Konvektion an Luft**

Die folgende Abbildung 20 zeigt exemplarisch zwei Standbilder aus Thermografieaufnahmen während der Bearbeitung. Links ist eine Einstechoperation zu sehen, rechts ein Längsdrehvorgang. Die thermografisch ermittelten Temperaturen an der Zerspanzone betragen in diesem Beispiel etwa  $233^\circ\text{C}$  beim Einstechen und  $272^\circ\text{C}$  bei der Längsdrehoperation. Sämtliche thermografisch ermittelten Temperaturen liegen unterhalb der im Vorfeld der Versuche erwarteten Temperaturen. Ungenauigkeiten bei der Kalibrierung auf den wahren Emissionsgrad dieser Zone einerseits, aber auch die geringe Größe der Zerspanzone andererseits mögen zu den niedrigen Temperaturen führen. In fast allen gemachten Videoaufnahmen sind wegfliegende Späne zu beobachten, deren Temperatur kurz nach dem Abtrennvorgang nahezu noch dieselbe wie in der Zerspanzone ist. Nach kurzer Flugstrecke jedoch kühlen sie deutlich ab. Auf Flächen liegende Späne weisen kurzzeitig noch Temperaturen von ca.  $140$  bis  $160^\circ\text{C}$  auf, kühlen jedoch auch rasch an der Luft ab. Bei der

Formgebung von Verkleidungs- und Gestellflächen im und am Späneschacht und an Stellen im Arbeitsraum, an denen Späne auftreffen, muss dem Rechnung getragen werden.

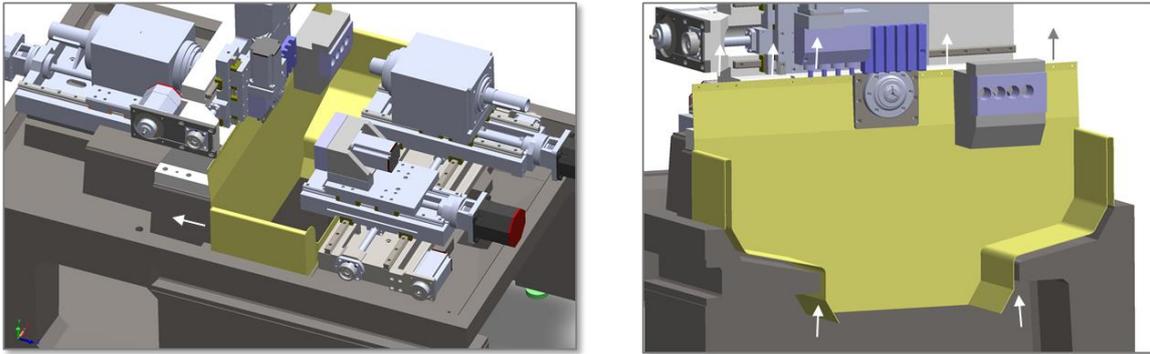


**Abbildung 20:** obere Reihe: Erwärmung durch rasche Bearbeitungsabfolge mit  $v_c = 190 \text{ m/min}$  und  $a_p = 1,0 \text{ mm}$ , untere Reihe: Abkühlung durch Konvektion an Luft

Zusammen mit der Fa. Maier Machines wurden Ansätze für eine konstruktive Anpassung der Maschine an MMS-Bedingungen erarbeitet. Im Wesentlichen sind dies:

1. Späneschacht mit steileren Wänden:
  - freier Spänefall nach unten
  - Vermeidung von heißen Spananhäufungen/ heißen Spänenestern
2. Thermoschilde
  - hinterlüftete Blechauskleidung des Arbeitsraums v.a. im Bereich des Späneschachts und unterhalb der Werkzeugträger
3. Absaugung
  - Frischluftzufuhr/Ansaugung aus dem Spänefördererschacht nach oben: frühzeitige Kühlung der heißen Späne im unteren Bereich des Arbeitsraums
  - Reduzierung des Wärmeeintrags in Gestellstruktur
4. Führungsbuchse:
  - MMS-Kühlkreis mit zusätzlicher Luftkühlung (Frischluftzufuhr über Abzweigluft von Absaugung)
  - Untersuchungen zur MMS tauglichen Führungsbuchse

Hinsichtlich einer möglichen Ausgestaltung eines Thermoschilds an dem existierenden Versuchsträger Maier F4 erarbeitete das IfW einen Designvorschlag, der in Abbildung 21 ersichtlich ist. Der Blechschild schirmt vornehmlich den Bereich des Späneschachts und die Ständerwand unter der Führungsbuchse ab. Er bildet einen Luftspalt zum Gestell, so dass ein kleiner Teil der Absaugluft von unten aus dem Späneschacht durch den Spaltraum hinter dem Schild strömen kann.



**Abbildung 21: Designentwurf des IfW für eine hinterlüftete Thermoschild-Bepunktung im Späneschacht und im hinteren Arbeitsraum unter der Führungsbusche**

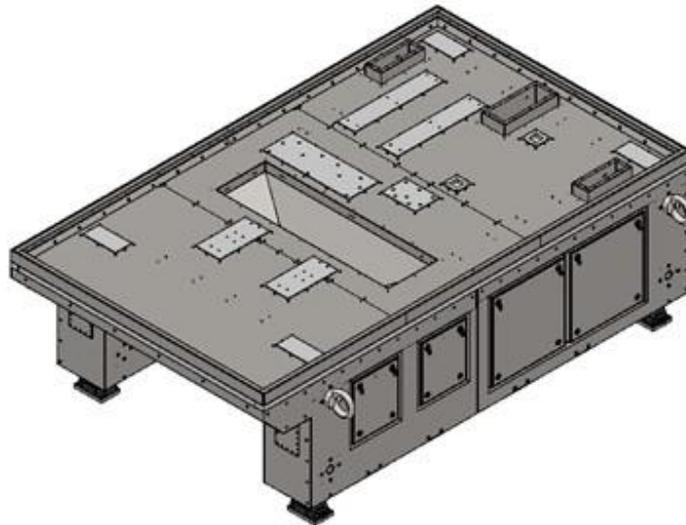
Die Maßnahmen 1-4 wurden in Form einer Nutzwertanalyse bewertet und mithilfe einer Wirtschaftlichkeitsberechnung auf Umsetzbarkeit geprüft. In der Zusammenführung ergab sich der größtmögliche Nutzen innerhalb eines völlig neu entwickelten Maschinenbetts. Dieses neuartige Maschinenbett wird generell aus nachhaltigen Werkstoffen realisiert. Das heißt: das Bett ist nicht wie die bisherigen Maschinenbetten in Form von Stahlguss ausgeführt, sondern vielmehr aus Zementbeton. Zementbeton erweist sich im Produktionsprozess als deutlich weniger energieintensiv als das Gießen von Gusseisen. Darüber hinaus ergeben sich maschinendynamisch und thermisch deutlich Vorteile gegenüber den bisherigen Stahlgussbetten. Abgeleitet daraus wurde eine komplett neue Maschinenbettkonstruktion.

Vorteile Maschinenbett aus Zementbeton:

- Die verlorene Form kann flexibel und ohne großen Aufwand an Spänefall und Bearbeitungsaufgabe angepasst werden. (Individualisierung)
- Zur Herstellung werden nur Bleche, Streben, Befestigungsplatten und Beton benötigt. (Vereinfachung Bettfertigung – Bett kann nun im Hause hergestellt werden)
- Es werden keine kostspieligen Gussformen benötigt (Wirtschaftlichkeit)
- Zementbeton weist eine sehr hohe Dämpfung auf (bessere Maschinendynamik)
- Zementbeton ist bezogen auf Erwärmung träge (thermisch stabil)

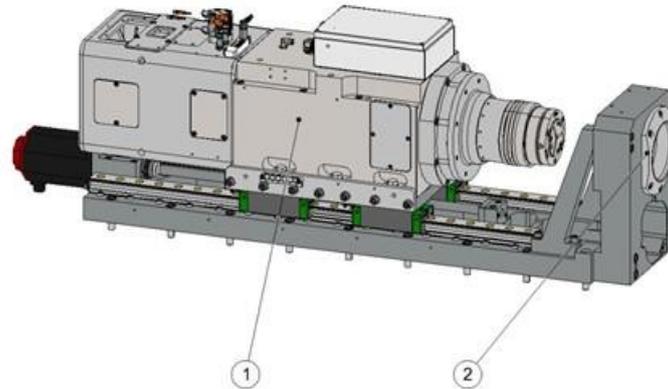
Dieses nun speziell für die Trockenbearbeitung angepasste Maschinenbett (Abb 22) erwies sich als ein guter Kompromiss zur Erfüllung der Anforderungen. Es wurde für einen optimierten Spänefall ausgelegt, um die in den Spänen enthaltene Prozesswärme möglichst schnell aus der Maschine über den Späneförderer entfernen zu können. Weiterhin erfolgte ein thermosymmetrischer Aufbau, um etwaige Ausdehnungen aufgrund von Erwärmungen durch spiegelnde Verschiebungen kompensieren zu können. Die Versorgungsleitungen wurden in das Bett eingegossen, was zu einer zuverlässigen und robusten Maschine führt.

Gleichzeitig war eine Kostensenkung gegenüber den bisherigen Betten um nahezu 15% möglich. Diese Erkenntnisse wird die Firma Maier nutzen und das Maschinenbett zur Serientauglichkeit für das Unternehmen weiterentwickeln. Damit wurden die Maßnahmen 1-3 optimal realisiert.



**Abbildung 22: Maschinenbett aus Zementbeton (angepasst an höchste thermische Beanspruchung)**

Die Maßnahme 4 „Führungsbuchse“ ist unabhängig vom Maschinenbett und wurde deshalb gesondert untersucht. Gerade bei den Langdrehmaschinen ist die Führungsbuchse ein prozessbestimmendes und elementares Maschinenelement. Durch die Führungsbuchse wird die zu bearbeitende Stange, welche durch die Drehspindel durchgeschoben wird und von der Drehspindel in Z bewegt wird, nahe an der Bearbeitungsstelle geführt. Die Bearbeitungswerkzeuge befinden sich hinter der Führungsbuchse, wodurch ein Wegdrücken der Stange durch die Buchse verhindert wird und auch lange schmale Durchmesser präzise bearbeitet werden können (Abb.23).



**Abbildung 23: Prinzip Langdrehen: 1. Spindel mit Z-Bewegung, 2. Führungsbuchse**

Insgesamt ist diese Konstellation die deutlichste Unterscheidung zu konventionellen Drehprozessen und damit auch das entscheidende Merkmal, weshalb bisherige Langdrehprozesse nicht in Form von Trockenbearbeitung/MMS durchgeführt wurden. Die Führungsbuchse ist aus maschinentechnischer Sicht ein Gleitlager und wird in den konventionellen Prozessen von dem Kühlmedium, nämlich Mineralöl, geschmiert. In der Konzeptionsphase des vorliegenden Forschungsprojektes wurden als Maßnahme 4 zwei Vorgehensweisen ausgewählt:

1. MMS-Kühlkreis mit zusätzlicher Luftkühlung (Frischlufzufuhr über Abzweigluft von Absaugung)  
Diese Maßnahme erwies sich in der Umsetzungsphase als untauglich. Die Luftführung und Abkühlung ist einerseits konstruktiv nur sehr aufwändig zu realisieren, andererseits sind die zusätzlichen Komponenten und steuerungstechnische Einrichtungen wirtschaftlich nicht abbildbar. Entsprechend wurde diese Maßnahme nicht umgesetzt.
2. Untersuchungen zur MMS tauglichen Führungsbuchse  
Bei der Untersuchung zur MMS tauglichen Führungsbuchse wird davon ausgegangen, die Führungsbuchse konstruktiv und technisch in der ursprünglichen Form zu belassen und lediglich Prozessparameter zu finden, welche einen Einsatz unter MMS Kühlschmiermedium zulassen. Als Ausgangspunkt wird dazu eine Hardwarekonfiguration der theoretisch günstigsten Gleitbedingungen gewählt.

Zur Validierung und zur Bestimmung der Prozessparameter der MMS tauglichen Führungsbuchse werden nun Versuche durchgeführt. Dazu wird das MMS Schmiergerät in die Langdrehmaschine integriert und das MMS Medium der Führungsbuchse zugeführt (Abb. 24).

Für folgende Versuche werden nun die Einstellparameter definiert. Bewertet werden die Einstellparameter anhand der Spindelbelastung im Leerlauf. Eine höhere Spindelbelastung (mit eingespannter Stange) bedeutet eine höhere Reibung an der Führungsbuchse. Diese sollte auch bei MMS Einsatz so gering wie möglich gehalten werden.



**Abbildung 24: MMS Gerät LSJ Mini von HPM angeschlossen an die Langdrehmaschine**

Versuchsdurchführung:

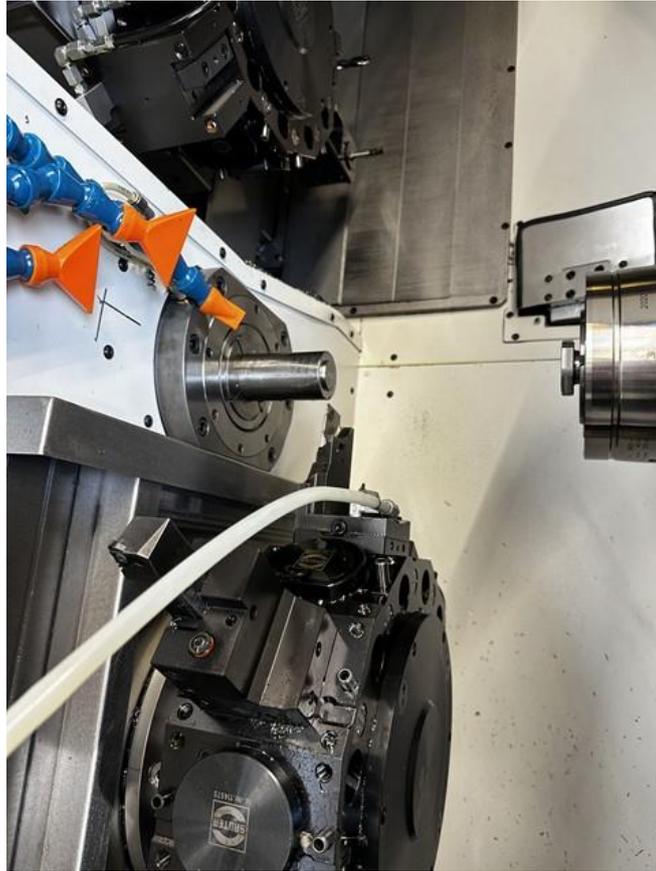
1. Referenzversuch:  
Maschine wird konventionell mit Vollstrahlkühlung (Mineralöl) betrieben. Stangendurchmesser 30 mm, Drehzahl 10 000 U/min.  
Ergebnis: Spindelbelastung 20%
2. Gegenversuch:  
Maschine wird komplett trocken betrieben. Kein Schmiermedium an der Führungsbuchse. Stangendurchmesser 30 mm, Drehzahl 10 000 U/min  
Ergebnis: Spindelbelastung 80%
3. Versuch mit MMS Schmierung:  
Maschine wird auf Basis der Einstellvorgaben des Sprühgeräteherstellers mit MMS betrieben. Führungsbuchse wird MMS geschmiert. Stangendurchmesser 30 mm, Drehzahl 10 U/min  
Ergebnis: Spindelbelastung 40%



**Abbildung 25: Zuführung des MMS Mediums direkt an die Führungsbuchse über Schmierleitung**

Die Untersuchungen der Führungsbuchse zeigen nun erstmalig die Umsetzbarkeit der Trockenbearbeitung bei Langdrehmaschinen. Ein komplett trockenes Zerspanen ohne MMS Medium kann nicht durchgeführt werden. Die Reibung der trockenen Führungsbuchse ist zu hoch, so dass nach kürzester Zeit aufgrund der Erwärmung ein „Fressen“ der Buchse bzw. Maschinenschäden zu erwarten sind. Wird die Führungsbuchse zusätzlich mit MMS Medium geschmiert, erhöht dies zwar die Reibung in der Buchse um nahezu das Doppelte gegenüber der Nassbearbeitung und Mineralölschmierung, ist allerdings für leichte Drehbearbeitungen ohne konstruktive Änderungen an der Führungsbuchse durchführbar (Abb. 25). Für die Schwerzerspanung (welche ohnehin bei den Langdrehern nicht den Großteil der Anwendungen darstellt) müsste zukünftig eine optimierte Buchse untersucht und entwickelt werden.

Die Firma Maier hat parallel zu den weiteren Projektpartnern eigenständig Grundsatzuntersuchungen der generellen Eignung der MMS-Schmierung für Langdrehmaschinen durchgeführt. Dazu wurden einfache Drehversuche durchgeführt. Im Wesentlichen waren dies: Längsdrehen, Querdrehen, Einstechdrehen und Bohren. Die Einstellparameter entsprechen den Vorgaben der Werkzeughersteller genauso wie die Einstellparameter des MMS-Gerätes. Die Zuführung des MMS-Medium erfolgte über eine Sprühdüse von außen (Abb. 26).



**Abbildung 26: Konfiguration MMS Drehversuche, Zuführung MMS über Sprühdüsen von außen**

Bearbeitet wurden 20 Werkstücke. Die Werkstücke wurden bezüglich ihrer technologischen Eigenschaften vermessen und jeweils verglichen mit der Nassbearbeitung (Maße, Oberflächengüten). Im Rahmen der Bearbeitung dieser kleinen Serie konnte die Tauglichkeit der MMS-Bearbeitung nachgewiesen werden. Lediglich bei der Bohrbearbeitung erfolgte ein vorzeitiger Schneidplattenbruch. Damit können beim Langdrehen unter MMS keine Bohrungen mit äußerer MMS durchgeführt werden. Da es bei den Langdrehern oftmals üblich ist, derartige Bohrungen durchzuführen, muss darauf geachtet werden, entsprechende MMS taugliche Bohrer einzusetzen, welche eine innere Kühlschmierung vorweisen.

## 4. Fazit

Abschließend lässt sich feststellen, dass im Rahmen dieses Entwicklungsvorhabens die technologischen, konstruktiven und prozessbedingten Maßnahmen zur Umstellung konventioneller Langdrehautomaten (unter Vollstrahlkühlung) auf MMS (Minimalmengenschmierung) erstmalig systematisch und wissenschaftlich untersucht wurden. Generell zeigt dieses Projekt sehr deutlich die Herausforderungen und die weiterhin zu beforschenden Aufgaben zur vollständigen Trockenlegung von Langdrehmaschinen. Bisherige konventionelle mit Öl geschmierte und gekühlte Langdrehautomaten wurden historisch bedingt genau in diese Richtung konstruktiv optimiert und können entsprechend nicht ohne weiteres zur Trockenbearbeitung (MMS) eingesetzt werden.

Dazu wurde der bisherige konventionelle Prozess beim Projektpartner Hazec mithilfe entsprechender Sensorik analysiert und die Einflüsse bei einer etwaigen Trockenbearbeitung (MMS) abgeleitet. Bereits bei diesen Untersuchungen wurde ein deutlicher Einfluss des Kühlschmiermediums auf den Thermohaushalt der Maschine erkannt. Erwärmt sich das Kühlschmiermedium, was in einer Serienproduktion insbesondere bei Hochdruckkühlung gezwungenermaßen der Fall ist, erwärmt sich die gesamte Maschine. Diese Temperaturführung durch das Kühlschmiermedium entfällt komplett bei der Trockenbearbeitung.

Die simulativen Untersuchungen des Projektpartners IFW zeigen als positiven Effekte ein vernachlässigbares Verformungsverhalten des Maschinenbetts aufgrund der zusätzlichen thermischen Belastung der Trockenbearbeitung. Hier zeigt sich bereits die konventionelle Maschine als eher „gutmütig“. Auch Messungen an der Realmaschine unterstützten die Ergebnisse der Simulation.

Die eigentlichen Herausforderungen liegen vielmehr innerhalb der bekannten Wärmequellen des Zerspanprozesses. Beispielsweise tragen die Späne 75% der Prozesswärme. Bisher wurden diese Späne mithilfe des Kühlschmiermediums zügig in den Späneförderer gespült und aus der Maschine abtransportiert. Die Spülung fällt bei der Trockenbearbeitung komplett weg. Entsprechend muss der Arbeitsraum so gestaltet werden, dass die Späne frei in den Späneförderer fallen können. Dies wurde bei der Neukonstruktion des Maschinenbetts der Firma Maier so auch berücksichtigt und damit eine deutliche Verbesserung erreicht. Darüber hinaus wurden insbesondere thermischen Verformungen konstruktiv im neuen Maschinenbett entgegengewirkt.

In der alleinigen Betrachtung (ohne Maschine und Spänehandhabung) des Zerspanprozesses der Langdreher ist eine Umstellung auf MMS unter Einschränkungen möglich. Für ein passendes Spanbild (keine Wirrspäne) müssen Schnittgeschwindigkeiten, Vorschübe und

Schneidengeometrie angepasst werden. Auf Basis der Versuchsergebnisse und mithilfe angepasster Werkzeuge und optimal eingestellter MMS Geräte sowie das passende Medium dazu, konnten Lösungen gefunden werden. Moderne Werkzeuge zeigen sich gegenüber den höheren Schneidentemperaturen ausreichend resistent. Der Verschleißfortschritt der Drehwerkzeuge ist geringfügig beschleunigt. Bohrprozesse, insbesondere bei größeren Bohrtiefen, können nicht mit äußerer MMS realisiert werden. Hier sind innengekühlte Bohrwerkzeuge notwendig (innere MMS-Zufuhr durch werkzeuginterne Kanäle), die den Einsatz von Spindeln mit innerer Kühlschmiermittelzufuhr (IKZ, Innen-Hochdruckkühlung) voraussetzen. Komplexe Zerspanprozesse sind nicht ohne weiteres möglich (Einstechen, Gewinden oder ähnliches) und wurden explizit im Rahmen dieses Projektes nicht untersucht. Die anfangs als größte Herausforderung befürchtete langdrehtypische Führungsbuchse welche in der Regel als Gleitlager, geschmiert durch das Kühlschmiermedium Mineralöl, ausgeführt ist, erwies sich ähnlich wie das Maschinenbett eher als thermisch „gutmütig“. Zwar erhöht sich bei der Schmierung mit MMS der Reibwiderstand. Bei geringen und normalen Maschinenbelastungen kann diese erhöhte Reibung aber akzeptiert werden.

Damit war dieses Projekt eine wichtige Basis zu grundlegenden analytischen und wissenschaftlichen Untersuchungen hinsichtlich zukünftiger ressourcenschonender und CO<sub>2</sub> neutralen Zerspanprozessen auf Langdrehmaschinen. Werden die noch bestehenden und diskutierten Herausforderungen gelöst, kann zukünftig auf das fossile Schmiermedium Mineralöl, welches momentan noch zu 100% auf Langdrehmaschinen eingesetzt wird, verzichtet werden. Gerade im Hinblick auf die produktionstechnisch und zerspanend geprägten Regionen in Deutschland ergibt sich hier eine gute Perspektive zur CO<sub>2</sub> neutralen Produktionstechnik.

## 5. Literaturverzeichnis

- /1/ Umweltbundesamt. (1. April, 2019). Entwicklung des CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktors für den Strommix in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2018 (in Gramm pro Kilowattstunde) [Graph]. In Statista. Zugriff am 18. Oktober 2019, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/38897/umfrage/co2-emissionsfaktor-fuer-den-strommix-in-deutschland-seit-1990/>
- /2/ Information BGI/GUV-I 213-723 (Juni 2009). BG/BGIA-Empfehlungen für die Gefährdungsbeurteilung nach der Gefahrstoffverordnung - Minimalmengenschmierung bei der Metallzerspanung
- /3/ Information BGI/GUV-I 718 (November 2010). Minimalmengenschmierung in der spanenden Fertigung
- /4/ DGUV Regel 109-003 (bisher BGR/GUV-R 143) (Mai 2009 aktualisierte Fassung März 2011). Tätigkeiten mit Kühlschmierstoffen
- /5/ Information BGI/GUV-I 71 (April 2009). Brand- und Explosionsschutz an Werkzeugmaschinen BGI/GUV-I 71
- /6/ Brinksmeier, E.; Meyera, D.; Huesmann-Cordesa, A. G.; Herrmann, C.: Metalworking fluids—Mechanisms and performance. In CIRP Annals. Volume 64, Issue 2, 2015, Pages 605-628
- /7/ Wegener, K.; Mayr, J.; Merklein, M.; Behrens, B.-A.; Aoyama, T.; Sulitka, M.; Fleischer, J.; Groche, P.; Kaftanoglu, B.; Jochum, N.; Möhring, H.-C.: Fluid elements in machine tools. In: CIRP Annals. Volume 66, Issue 2, 2017, Pages 611-634
- /8/ Schestag, R.: Aufwand und Kosten aus dem Kühlschmierstoff-Einsatz. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, <http://www.umweltschutz-bw.de>, 2012
- /9/ Kuchenmeister, R.: Kosten- und Qualitätsvorteile. Minimalmengenschmierung versus Nassbearbeitung. In: Werkstatt & Betrieb, 6/2012. S. 75-77
- /10/ N.N.: Schneidölverlust minimieren durch Brikettierung (17.03.2016). In Recycling Magazin. Zugriff am 29.11.2019, von <https://www.recyclingmagazin.de/2016/03/17/schneidoelverlust-minimieren-durch-brikettierung/>
- /11/ Hermann, C. et al.: Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands - Wassermischbare Kühlschmierstoffe. Studie. Hrsg. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)
- /12/ N.N: Tätigkeiten mit Kühlschmierstoffen. DGUV Regel 109-003. Hrsg. DGUV Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
- /13/ Fritsche, U.: Endenergiebezogene Gesamt-emissionen für Treibhausgase aus fossilen Energieträgern unter Einbeziehung der Bereitstellungsvorketten. Kurzbericht im Auftrag des Bundesverbands der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft e.V. (BGW). 2007. IINAS GmbH – Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und –strategien. Zugriff am 03. Dezember 2019, von [iinas.org/tl\\_files/iinas/downloads/GEMIS/2007\\_thg\\_fossil\\_BGW.pdf](http://iinas.org/tl_files/iinas/downloads/GEMIS/2007_thg_fossil_BGW.pdf)

- 
- /14/ Stehle, T.; Eisseler, R.: Steigerung der Akzeptanz und des Einsatzes von Minimalmengenschmierung in der spanenden Fertigung. Forschungsbericht BWPLUS Förderkennzeichen: BWRE16002
- /15/ Tönshoff HK, Denkena B. Spanen, Grundlagen, Springer, Berlin/Heidelberg, 2004.
- /16/ Sukaylo V. Numerische Simulation der thermisch bedingten Werkstück-Abweichungen beim Drehen mit unterschiedlichen Kühlschmiermethoden, Otto-von-Guericke-University Magdeburg, 2003.
- /17/ Karwa, N.: Experimentelle Untersuchung der Prallkühlung von heißen Stahlplatten mittels Wasserstrahlen. Diss., TTD, TU Darmstadt, 2012.
- /18/ Viscorova, R.: Untersuchung des Wärmeübergangs bei der Spritzwasserkühlung unter Berücksichtigung des Einflusses der Verzunderung. Diss., TU Clausthal, 2007.

## 6. Anhang

### 6.1 Anhang A1

Die folgenden Diagramme zeigen zum Zwecke des übersichtlichen Vergleichs eine Zusammenstellung über das Verhalten von Schnittkräften, Werkzeugtemperaturen und Momentenbildendem Strom-Istwert beim Längsdrehen unter MMS-Kühlschmierung bei Schnitttiefen von  $a_p = 0,5; 1,0; 1,5$  und  $2,0$  mm.

