Schlussbericht

zum

Forschungsvorhaben

Produktives Seilschleifen von Stahl durch modellbasierte Prozessauslegung (ProSeil)

Förderkennzeichen: 15S9424

Laufzeit: 01.10.2020 bis 31.12.2023

Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW)

Leibniz Universität Hannover

Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena

Projektbearbeiter:

M. Sc. Christian Heller

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium für Bildung und Forschung

Projektträger:

GRS

Inhaltsverzeichnis

1 Kurzfassung 3
2 Kurzdarstellung 7
2.1 Motivation 7
2.2 Zielsetzung 7
2.3 Vorgehensweise 8
2.3.1 Stand der Forschung 9
2.3.2 Eigene Vorarbeiten 9
2.3.3 Literatur 11
2.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 12
3 Eingehende Darstellung 13
3.1 Darstellung der erzielten Ergebnisse 13
3.1.1 Erweiterung und Verifizierung des Versuchsstandes (AP 1) 13
3.1.2 Untersuchung der Werkzeugspezifikation (AP 2) 18
3.1.3 Einsatz- und Verschleißverhalten (AP 3) 22
3.1.4 Modellierung des Seilschleifprozesses (AP 4) 27
3.1.5 Bewertung der Leistungsfähigkeit (AP 5) 32
3.1.6 Fazit 35
3.2 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse 37
3.2.1 Wissenschaftlicher Nutzen 37
3.2.2 Kommerzieller Nutzen 37
3.3 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 38
3.4 Veröffentlichungen und Vorträge 38
3.4.1 Erfolgt 38
3.4.2 Geplant 38

Erklärung

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 15S9424 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin / beim Autor.

1 Kurzfassung

Das Seilschleifen wird aufgrund seiner Flexibilität vermehrt beim Rückbau kerntechnischer Anlagen zum Trennen von Stahlbauteilen eingesetzt. Das wirtschaftliche Potential dieser Fertigungstechnik wurde bereits in verschiedenen Rückbauprojekten aufgezeigt. Insbesondere die vielfältigen Bauteilgeometrien und die Werkstoffvielfalt im Rückbau stellen dabei eine große Herausforderung dar. Besonders das Trennen von Stahlbauteilen ist aufgrund derzeit noch unzureichender Prozesskenntnis mit einem erheblichen Verlust der Werkzeugstandzeit verbunden. Zudem kommt es hier häufig zum vorzeitigen Komplettversagen des Werkzeugs. Im Rückbau kerntechnischer Anlagen wird zusätzlich auf die konventionelle Wasserkühlung verzichtet, um Querkontaminationen zu vermeiden. Dies erhöht die thermomechanische Belastung des Werkzeugs soweit, dass es zur thermischen Überlastung der Werkzeugummantelung kommt. Dies führt dazu, dass sich die Schleifsegmente auf dem Trägerseil vorzeitig lösen können, was im Verhaken des Werkzeugs am Werkstückeintritt und schließlich im Komplettversagen des Werkzeugs resultiert. Bisherige Untersuchungen haben bereits gezeigt, dass beim Trennen von Stahl die thermische Belastung der Werkzeugummantelung das ausschlaggebende Standzeitkriterium von Seilschleifwerkzeugen darstellt. Aktuell sind die thermodynamischen Zusammenhänge im Seilschleifprozess nicht hinreichend bekannt. Deshalb ist eine gezielte Prozess- und Werkzeugauslegung zur Vermeidung dieser thermischen Überlastung des Werkzeugs nicht möglich. Ziel dieses Vorhabens ist deshalb die Verfügbarkeit einer Methode zur systematischen Auslegung des trockenen Seilschleifens metallischer Werkstoffe unter Berücksichtigung temperaturrelevanter Faktoren, die zu einer hinreichend geringen Werkzeugtemperatur und damit zu einer Steigerung der Standzeit der Seilschleifwerkzeuge führt.

Dafür wurde zunächst der Versuchsstand erweitert, sodass die Zuführung der Druckluftkühlung kontrolliert eingestellt und überwacht werden kann. Durch Messungen der Austrittsgeschwindigkeit und –temperatur konnte so die Druckluftkühlung optimiert werden. Im Rahmen der Untersuchungen wurde durch analytische Betrachtung der thermodynamischen Zusammenhänge des Seilschleifprozesses festgestellt, dass durch eine geeignete Kühlkonfiguration eine Kühlleistung erreicht werden kann, die bei hohen Werkzeugtemperaturen bis zu 25 % des prozessinduzierten Wärmestroms in das Werkzeug ausmacht.

Anschließend wurde der Einfluss der werkzeugseitigen Kenngrößen Korngröße und Segmentlänge durch die Fertigung prototypischer Seilschleifwerkzeuge untersucht. Diese beeinflussen die Einzelkornspanungsdicke des Prozesses bei konstanten Prozessstellgrößen. Hier konnte ein direkter Zusammenhang zwischen der Einzelkornspanungsdicke und der thermomechanischen Belastung identifiziert werden. Besonders die Verringerung der Segmentlänge führt hier zu einer Steigerung der Effizienz des Schleifprozesses, da hier Reibungsverluste durch Unterschreiten der Mindestspanungsdicke verringert werden. Dieses Werkzeug bietet somit auch bei höherer Produktivität Leistungsreserven gegenüber aktuell industriell eingesetzten Seilen.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde anschließend der Einfluss der Systemgrößen Seillänge Kühlkonfiguration auf das Einsatz- und Verschleißverhalten in einem breiten Prozessstellgrößenfenster untersucht. Hier zeigt sich, dass eine Schnittgeschwindigkeit von 20 m/s und eine Vorschubgeschwindigkeit von 5 mm/min das optimale Verhältnis aus thermomechanischer Belastung und erreichbarer Produktivität bietet. So konnte bereits eine Steigerung der Werkzeugstandfläche von 16 % bei einer konstanten Zeitspanfläche von ca. 650 cm²/min erreicht werden. Durch den Einsatz des Prototypen-Werkzeugs mit kleinster Segmentlänge wurde sogar eine Verdopplung der Standfläche gegenüber der industriellen Referenz erreicht.

Im letzten Schritt wurden die gewonnen Erkenntnisse zusammengefasst und auf das Trennen von schwer zerspanbarem Edelstahl 1.4571 übertragen, da dieser Werkstoff ebenfalls eine hohe industrielle Relevanz besitzt und die ein deutlich höheren Werkzeugverschleiß bedingt. Die Ergebnisse wurden anschließend in den Stand der Technik eingeordnet. So konnte beim Trennen des Edelstahls bei einer Steigerung der Standfläche von 10 % die Produktivität um 79 % gegenüber vergleichbaren Prozesses vorheriger Forschungsprojekte erreicht werden. Beim Baustahl wurde eine Steigerung der Produktivität von 93 % bei vergleichbarer Standfläche (+3 %) erreicht.

Mit Abschluss des Projekts ist bekannt, wie die System- und Prozessstellgrößen sowie das Seilschleifwerkzeug ausgelegt werden muss, um die standzeitlimitierende thermische Überlastung der Werkzeuggummierung zu verringern und die Effizienz die Produktivität des Seilschleifprozesses signifikant zu steigern. Dies erhöht die Wirtschaftlichkeit des Prozesses im kerntechnischen Rückbau, wodurch Anwender und Hersteller von Seilschleifwerkzeugen gleichermaßen profitieren.

Due to its flexibility, wire sawing is increasingly used for cutting steel components in the decommissioning of nuclear facilities. The economic potential of this manufacturing technique has already been demonstrated in various decommissioning projects. The diverse component geometries and material variety in decommissioning pose a significant challenge. Particularly, cutting steel components is associated with a significant loss of tool life due to currently insufficient process knowledge. Moreover, this often leads to premature complete tool failure. In the decommissioning of nuclear facilities, conventional water cooling is also avoided to prevent cross-contamination. This increases the thermomechanical load on the tool to the point where the thermal overload of the tool coating occurs. This can cause the grinding segments to detach prematurely from the carrier wire, leading to the tool snagging at the workpiece entry and ultimately resulting in complete tool failure. Previous studies have already shown that in cutting steel, the thermal load on the tool coating is the decisive criterion for the tool life of wire sawing tools. Currently, the thermodynamic relationships in the wire sawing process are not sufficiently known. Therefore, a targeted process and tool design to avoid this thermal overload of the tool is not possible. The aim of this project is thus to develop a method for the systematic design of dry wire sawing of metallic materials considering temperature-relevant factors that lead

to a sufficiently low tool temperature and thereby increase the tool life of wire sawing tools.

To this end, the test stand was initially expanded so that the supply of compressed air cooling could be controlled and monitored. By measuring the exit velocity and temperature, the compressed air cooling was optimized. During the investigations, analytical consideration of the thermodynamic relationships of the wire sawing process revealed that an appropriate cooling configuration could achieve a cooling performance that accounts for up to 25% of the process-induced heat flow into the tool at high tool temperatures.

Subsequently, the influence of the tool-side parameters grain size and segment length was investigated by manufacturing prototype wire sawing tools. These parameters affect the single grain chip thickness of the process at constant process parameters. A direct relationship between single grain chip thickness and thermomechanical load was identified. Particularly, reducing the segment length increases the efficiency of the grinding process by reducing friction losses through falling below the minimum chip thickness. This tool thus offers performance reserves over currently industrially used wires even at higher productivity.

Building on these findings, the influence of the system parameters wire length and cooling configuration on the use and wear behavior was subsequently investigated across a wide range of process parameters. It was found that a cutting speed of 20 m/s and a feed rate of 5 mm/min provide the optimal ratio of thermomechanical load and achievable productivity. An increase in tool life by 16% with a constant material removal rate of approximately 650 cm^2/min was achieved. Using the prototype tool with the smallest segment length even doubled the tool life compared to the industrial reference.

In the final step, the findings were summarized and transferred to cutting hard-to-machine stainless steel 1.4571, as this material also has high industrial relevance and causes significantly higher tool wear. The results were then compared to the state of the art. When cutting stainless steel, a 10% increase in tool life achieved a 79% increase in productivity compared to comparable processes in previous research projects. For construction steel, a productivity increase of 93% with a comparable tool life (+3%) was achieved.

With the completion of the project, it is now known how to design the system and process parameters as well as the wire sawing tool to reduce the tool life-limiting thermal overload of the tool coating and significantly increase the efficiency and productivity of the wire sawing process. This increases the economic efficiency of the process in nuclear decommissioning, benefiting both users and manufacturers of wire saws.

2 Kurzdarstellung

2.1 Motivation

Mit dem deutschen Atomausstieg wird in den nächsten Jahrzenten der Rückbau der kerntechnischen Anlagen eine zentrale Rolle einnehmen. Zusätzlich zu der Stilllegung aufgrund politischer Beschlüsse müssen Kernkraftwerke rückgebaut werden, wenn sie das Ende ihrer Betriebszeit erreicht haben, sodass ein weiterer Leistungsbetrieb technologisch oder wirtschaftlich nicht vertretbar ist. Insbesondere die Zerlegung von metallischen Strukturen wie Wärmetauschern oder Dampftrocknern stellt dabei eine besondere Herausforderung an den Fertigungsprozess. Hier zeichnet sich das Seilschleifen durch seine hohe Flexibilität bezüglich der Zugänglichkeit und Bauteilgeometrie aus. Deshalb wird beim Rückbau kerntechnischer Anlagen zunehmend auf diese Technologie gesetzt. Zur Vermeidung von kontaminiertem Kühlmittel liegt der Fokus auf der Weiterentwicklung des druckluftgekühlten Seilschleifverfahrens. Der Verzicht auf Wasserkühlung geht jedoch mit einer Verringerung der Produktivität und Standzeit aufgrund der deutlich höheren thermischen Belastung des Werkzeugs einher.

Bei der Bearbeitung von Stahlstrukturen und hocharmierten Betonbauteilen werden heutzutage ausschließlich einschichtig belegte Seilschleifsegmente verwendet, da das duktile Verhalten von Stahl keine Selbstschärfung der Segmente ermöglicht. Bei diesen Werkzeugen wird eine Lage Diamantkörner galvanisch oder mittels Aktivlot an die Oberfläche der Perlengrundkörper gebunden. Die Einsatzfähigkeit einschichtiger Werkzeuge nimmt im Zerlegeprozess kontinuierlich ab. Durch Abstumpfen und Splittern der Diamanten erhöht sich die Reibung im Prozess, wodurch die mechanische und thermische Belastung des Werkzeugs kontinuierlich ansteigt. Infolge der steigenden thermischen Belastung kommt es zur thermischen Versprödung der Gummierung des Werkzeugs. Dadurch versagt in Kombination mit der hohen mechanischen Biegewechselbelastung der Haftungsverbund zwischen Gummierung, Schleifsegment und Trägerseil. Dies hat ein Aufschieben der Schleifsegmente zur Folge, wodurch Teile des Trägerseils freigelegt werden und damit die Standzeit des Werkzeugs erreicht wird. Das Versagen des Haftungsverbundes als standzeitlimitierendes Kriterium einschichtiger Werkzeuge konnte in vorherigen Arbeiten bereits nachgewiesen werden. Diese Effekte werden durch mangelnde Prozessverständnis verstärkt, da bisher Seilschleifprozesse und –werkzeuge nicht gezielt auf die Reduzierung der thermischen Überlastung der Gummierung ausgelegt wurden.

2.2 Zielsetzung

Ziel dieses Vorhabens ist die Verfügbarkeit einer **Methode zur systematischen Auslegung des trockenen Seilschleifens metallischer Werkstoffe unter Berücksichtigung temperaturrelevanter Faktoren**, die eine deutliche Steigerung der Standzeit von Seilschleifprozessen von mindestens 50 % gegenüber konventionell ausgelegten Prozessen ermöglicht. Als Grundlage zur Entwicklung dieser Methode wird der Seilschleifprozess als thermodynamisches System betrachtet und die auftretenden Wärmeströme bilanziert, da das Versagen der Ummantelung aufgrund zu hoher Werkzeugtemperatur bei aktuell eingesetzten Werkzeugkonzepten standzeitlimitierend ist. Abgeschlossene

Forschungsvorhaben haben bereits das Potential einer Druckluftkühlung (BMBF ProBeSt) sowie einer veränderten Werkzeugspezifikation (BMBF Sekomet) zur Reduzierung der Werkzeugtemperatur im Seilschleifprozess aufgezeigt. Eine Reduzierung des Werkzeugdurchmessers besitzt ebenfalls Einfluss auf die Werkzeugtemperatur, da sich hieraus ein verringerter Energieeintrag in den Prozess ergibt. Diese Größe wird jedoch in diesem Vorhaben nicht untersucht, weil Werkzeuge mit verändertem Durchmesser einen erheblichen Fertigungsaufwand bedeuten und in der industriellen Anwendung nicht mit bestehenden Werkzeugmaschinen kompatibel wären. Ein großer Anteil der im Prozess entstandenen Wärme wird vom Werkzeug außerhalb der Eingriffszone an die Umgebungsluft abgegeben. Somit stellt auch die freie Werkzeuglänge einen relevanten Faktor zur Reduzierung der Werkzeugtemperatur dar. Aus diesen Gründen werden die temperaturrelevanten Systemgrößen Werkzeugspezifikation, Kühlung und freie Seillänge variiert und ihr Einfluss auf die Wärmebilanz bestimmt. Das entstandene Modell wird durch experimentelle Untersuchungen validiert und verwendet die temperaturrelevanten Eingangsgrößen Kühlleistung, freie Werkzeuglänge und Werkzeugspezifikation. Aus dieser Zielsetzung und entsprechenden Vorüberlegungen leiten sich die folgenden Teilziele/Meilensteine ab:

- Kenntnis des Einflusses der Werkzeugspezifikation auf die thermomechanische Belastung
- Verfügbarkeit eines Versuchsstandes zur Variation der Werkzeuglänge und der Kühlleistung der Druckluftkühlung im relevanten Bereich
- Kenntnis des Einflusses temperaturrelevanter Faktoren auf die thermomechanische Belastung und deren Wechselwirkung
- Verfügbarkeit eines erweiterten empirischen Modells zur Berechnung der Werkzeugtemperatur und Prozesskraft im Seilschleifprozess
- Kenntnis der Leistungsfähigkeit

2.3 Vorgehensweise

Um die Projektziele zu erreichen, wurde ein aus fünf Arbeitspaketen (AP) bestehendes Arbeitsprogramm durchgeführt. Die Vorgehensweise ist in Bild 1 dargestellt. Zusätzlich umfasst das Forschungsprojekt die Dokumentation der durchgeführten Arbeiten sowie die Veröffentlichung der erzielten Forschungsergebnisse.

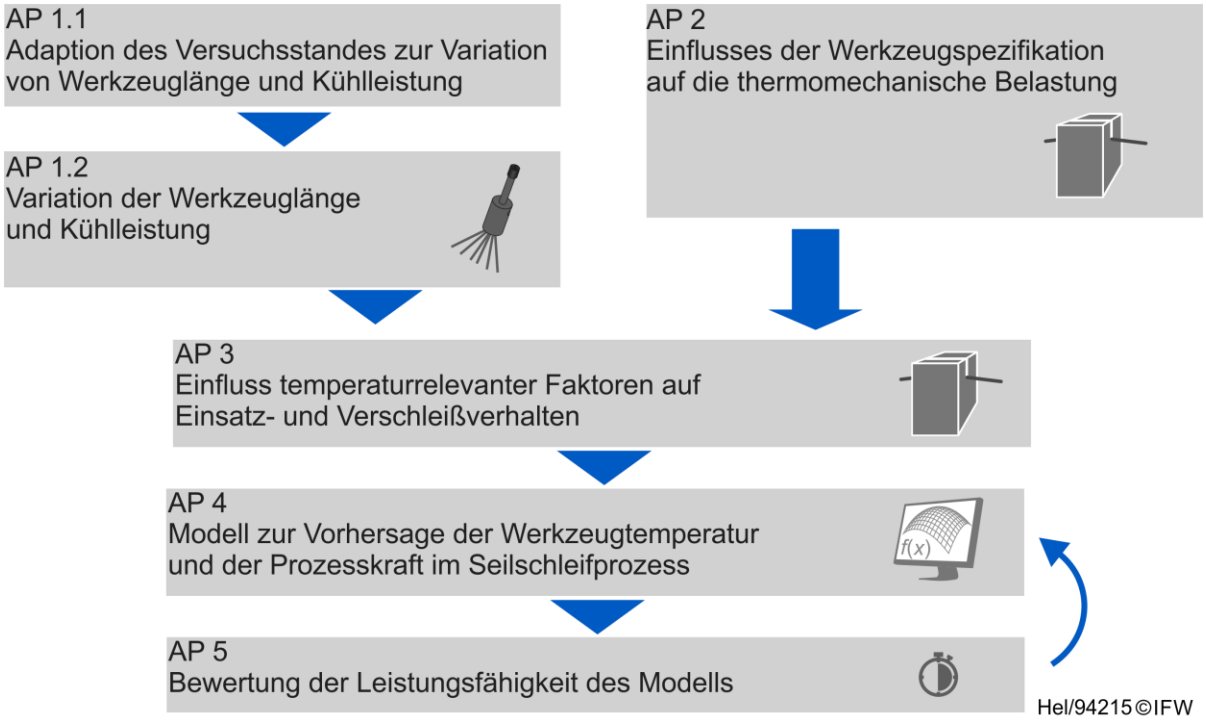


Bild 1:Vorgehensweise

Zunächst wurde der vorhandene Versuchsstand mit geeigneter Messtechnik ausgestattet, um eine gezielte Variation der Werkzeuglänge und Kühlleistung zu ermöglichen. Anschließend wurde der Einfluss der temperaturrelevanten Faktoren Seillänge und Kühlleistung auf die Werkzeugtemperatur untersucht (AP 1). Im Anschluss wurden unterschiedliche Seil-Prototypen hergestellt, die sich hinsichtlich Korngröße und Segmentlänge unterscheiden (AP 2). Danach wurde das Einsatz- und Verschleißverhalten unter Berücksichtigung temperaturrelevanter Faktoren bestimmt (AP 3). In AP 4 folgte die analytische Modellierung der Wärmeverteilung im Schleifprozess, um einen temperaturoptimierten Prozess auszulegen. Diese Werkzeug- und Prozessauslegung wurde abschließend validiert und die Ergebnisse in den Stand der Technik eingeordnet (AP 5).

2.3.1 Stand der Forschung

Der Stand der Forschung auf dem Gebiet des Seilschleifens von Stahl ist bereits im Antrag zu diesem Vorhaben ausführlich beschrieben worden. Neue, für das Forschungsvorhaben relevante Erkenntnisse von anderen Forschungseinrichtungen, sind während der Laufzeit dieses Projekts nicht veröffentlicht worden.

2.3.2 Eigene Vorarbeiten

Die Seilschleiftechnologie ist bereits seit über 30 Jahren ein Forschungsschwerpunkt am Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW). Apmann untersuchte in seiner Dissertation die Anpassung der Diamantkonzentration in den Schleifperlen von Seilschleifwerkzeugen bei der Bearbeitung von armiertem Stahlbeton und rein metallischen Strukturen. Mit Hilfe von Einzelkornritzuntersuchungen wurden Faktoren ermittelt,

die in einem Modell die gezielte Berechnung der Diamantkonzentration in den Schleifperlen in Abhängigkeit des zu bearbeitenden Werkstoffs ermöglichen [Apm04].

Neben dem Einsatzverhalten wurden am IFW auch neuartige Perlenprototypen untersucht und Ansätze für eine deterministische Anordnung des Schneidstoffs auf Seilschleifperlen entwickelt. Zusätzlich zur Untersuchung der grundsätzlichen Eignung unterschiedlicher Werkzeugkonzepte für den Einsatz an metallischen Strukturen, wurden im Vorhaben „Keramische Seilschleifperlen zur Bearbeitung von hocharmierten Beton- und reinen Stahlstrukturen (ZIM KeraSP, KF2328102PK9)“ des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM) erstmals die Potentiale einer keramisch gebundenen CBN-Seilschleifperle erforscht. Ein Großteil der Perlenprototypen wies aber bereits im Ausgangszustand Risse und deutliche Schleifbelagsabplatzungen auf, was einerseits auf das eingesetzte, keramische Bindungssystem zurückzuführen ist, andererseits auf die damals verfügbare, sintertechnologische Herstellung [Den11a]. Aufgrund von Spannungsrissen in der Keramik beim Heißpressen, konnten lediglich durch Freisintern bei hohen Temperaturen einsatzfähige Schleifperlen hergestellt werden. Diese versagten jedoch nach kurzem Einsatz aufgrund zu hoher Impulsbelastung im Seilschleifprozess. Der Trend zur trockenen Bearbeitung von Stahlwerkstoffen wurde im Vorhaben „Prozessentwicklung zur trockenen Bearbeitung metallischer und mineralischer Strukturen beim Rückbau kerntechnischer Anlagen (BMBF ProBeSt, 02 S 8629)“ fortgeführt. Hier stand die Analyse der thermischen Werkzeugbeanspruchung bei trockenen, an metallischen Strukturen eingesetzten Seilschleifwerkzeugen im Fokus. Mittels einer in diesem Forschungsvorhaben entwickelten, alternativen Kühleinheit können die Werkzeugtemperaturen so stark gesenkt werden, dass Seilschleifwerkzeuge nun trocken und prozesssicher eingesetzt werden können [Den11b]. Das Forschungsvorhaben „Angepasstes Seilsägen komplexer metallischer Strukturen (BMBF Sekomet, 15 S 9134)“ hat die gewonnen Erkenntnisse des Vorhabens „ProBeSt“ weiterentwickelt und den Einfluss der Werkstückgeometrie untersucht. Hierzu wurden zunächst das Einsatz- und Verschleißverhalten konventioneller Seilschleifwerkzeuge untersucht und Prozessführungsstrategien abgeleitet. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden ein Anforderungsprofil und ein Konzept für ein angepasstes Seilschleifwerkzeug erstellt und prototypisch umgesetzt. Durch die Variation der Schleifsegmentlänge bei unveränderter Schleifsegmentanzahl konnte die Leistungsfähigkeit des Seilschleifprozesses bei der Bearbeitung nichtmassiver Strukturen signifikant gesteigert werden. Abschließend wurde die Eignung des entwickelten Werkzeugkonzepts an einem Musterbauteil eines Reaktorkerndeckels aus dem kerntechnischen Rückbau nachgewiesen. Im Vergleich zu konventionellen Werkzeugen konnten hierbei unter sonst gleichen Bedingungen die Werkzeuglebensdauer um 44 % und die Produktivität um 14 % gesteigert werden (vgl. Bild 2) [Den16].

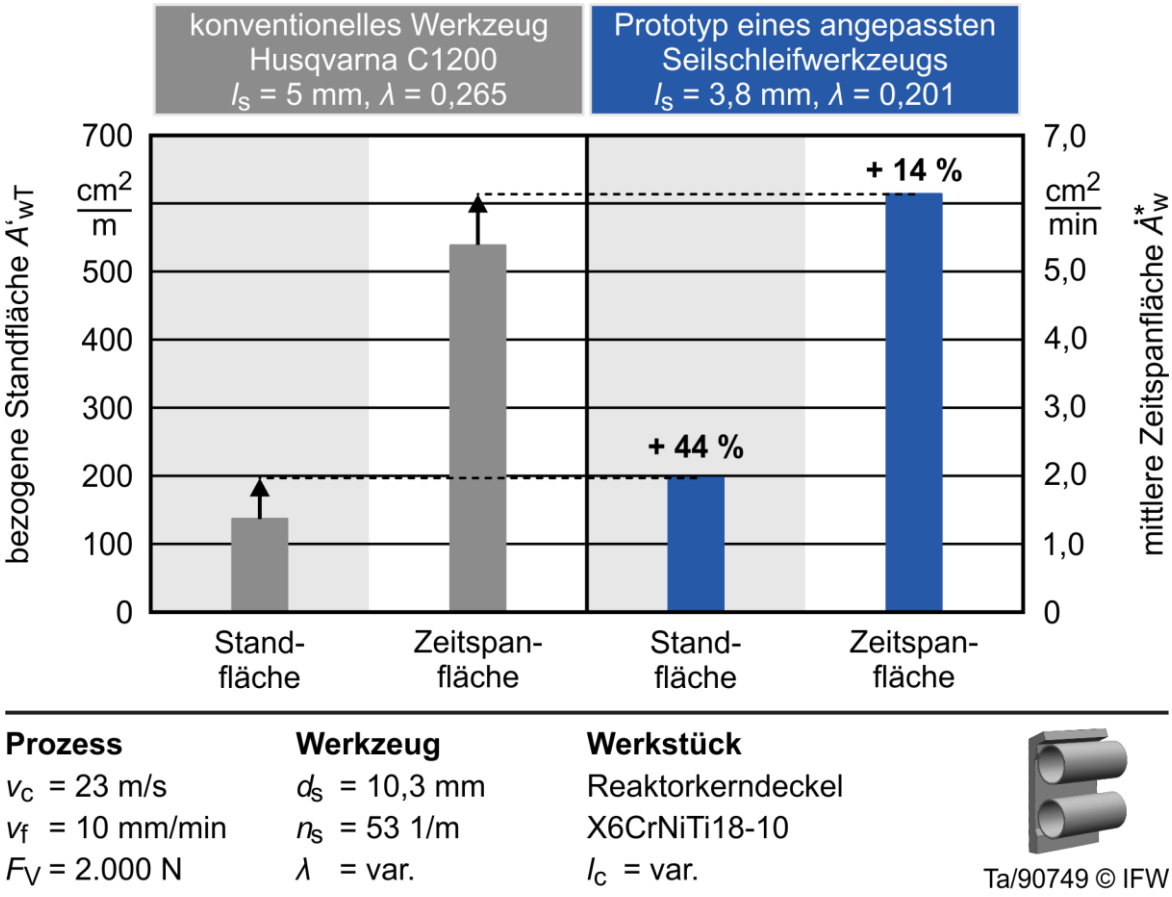


Bild 2: Ergebnisse des Forschungsvorhabens Sekomet

Im zuletzt abgeschlossenen Forschungsvorhaben „Innovatives Seilschleifkonzept für die Bearbeitung von Stahl (BMBF InnoSeil 15S9404)“ lag der Fokus auf der Entwicklung eines neuartigen Werkzeugkonzepts. Dieses beinhaltet mehrschichtige CBN-Schleifperlen und eine angepasste Vergussmasse zur optimalen Bearbeitung von metallischen Werkstoffen im trockenen Verfahren. Durch die Erforschung einer temperaturstabilen Gummierung konnte so hier bereits eine deutliche Steigerung der Lebensdauer erreicht werden.

2.3.3 Literatur

[Apm04] Apmann, H. (2004): Seilschleifen von metallischen und mineralischen Werkstoffen. Dr.-Ing.-Dissertation, Leibniz Universität Hannover

[Den11a] Denkena, B., Köhler, J., Ermisch, E. (2011): Wire Cutting Tool Concepts for Steel Machining, Advances in Abrasive Technology XIV, 14th International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT 2011), September 18-21, Stuttgart, Deutschland:

[Den11b] Denkena, B.; Köhler, J.; Seiffert, F. (2011): Anpassung der Seilschleiftechnologie an die besonderen Anforderungen des Rückbaus kerntechnischer Anlagen. atw - International Journal for Nuclear Power 56, Nr. 8/9, S. 469–476.

[Den16] Denkena, B.; Grove, T.; Tatzig, L. (2016): A mechanical model of diamond wire sawing of steel structures, ISAAT 2016, 02.-05. Oktober 2016, Stockholm, Schweden.

[Mar13] Marinescu, I. D.; Rowe, W. B.; Dimitrov, B.; Ohmori, H. (2013): Tribology of Abrasive Machining Processes. 2nd edition. Elsevier.

[Row91] Rowe, W.B.; Morgan, M.N.; Allanson, D.A. (1991): An Advance in the Modelling of Thermal Effects in the Grinding Process. CIRP Annals, Volume 40, Issue 1, S. 339-342.

2.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

- Entfällt -

3 Eingehende Darstellung

3.1 Darstellung der erzielten Ergebnisse

3.1.1 Erweiterung und Verifizierung des Versuchsstandes (AP 1)

Ziel dieses Arbeitspakets ist die Verfügbarkeit eines geeigneten Versuchsstandes zur Durchführung der Laboruntersuchungen. Dafür wird eine Erweiterung der vorhandenen Maschinen am IFW benötigt, die eine gezielte Variation der Werkzeuglänge und der Kühlleistung ermöglicht.

Zunächst war hierfür eine Überarbeitung des Analogieprüfstandes auf der Flachschleifmaschine FS840KT der Firma Geibel & Hotz geplant. Es sollte eine zusätzliche Linearachse sowie eine Kühleinheit installiert werden. Dies konnte nicht wie geplant umgesetzt werden.

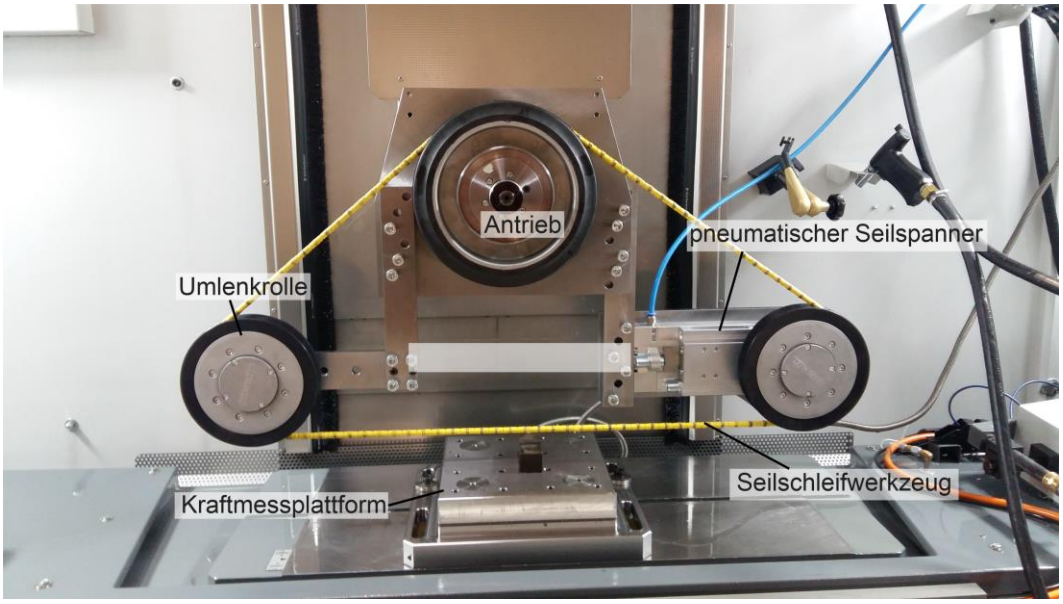


Bild 3: Aufbau des Analogieprüfstandes

Da der vollständige Aufbau auf der Spindel montiert wird, ist die dynamische Last im Betrieb sehr hoch (vergleiche Bild 3). Das erhebliche Mehrgewicht der Kühleinheit und der Linearachse hat in Verbindung mit den geforderten Schnittgeschwindigkeiten bereits beim Anbringen erster weiterer Bauteile an den Aufbau zum Versagen der Werkzeugspindel geführt. Weiterhin haben Schleifversuche ohne weitere Aufbauten gezeigt, dass die hier maximal mögliche einsetzbare Werkstückgröße sehr gering ist, wodurch es bei Verschleißuntersuchen zu einem erheblichen Erhitzen des Werkstücks kommt. Dieser Umstand ist nicht mehr direkt mit tatsächlichen Seilschleifmaschinen vergleichbar. Zwar ermöglicht der Analogieprüfstand die effiziente Erprobung neuartiger Werkzeugkonzepte, für die in diesem Projekt geplante thermische Betrachtung ist er somit aber nicht geeignet. Aus diesen beiden Gründen wurde deshalb entschieden, das Projekt ausschließlich auf dem stationären Seilschleifprüfstand durchzuführen. Der dadurch entfallene Versuchsumfang wurde kompensiert, indem auf dem stationären Seilschleifprüfstand die Versuchszahl erhöht wurde. Zudem wurden 5 statt 3 (AP 1) bzw. 3 statt 1 (AP 3 und 5) Wiederholversuche durchgeführt, um die Validität der Ergebnisse zu erhöhen.

Da die Versuche auf dem großen Versuchsstand deutlich länger dauern, wurde der entfallene Ausfall somit deutlich kompensiert.

Der stationäre Versuchsstand wurde entsprechend der Anforderungen angepasst. Dazu wurde die Kühleinheit überarbeitet, sodass die 4 Wirbelrohre einzeln gesteuert werden können und der Druck einzeln eingestellt und während des Versuchs überwacht werden kann. Der zusätzliche Aufbau ist in Bild 4 dargestellt. Weiterhin wurde eine zweite Druckluftleitung zur Maschine gelegt, um die Kühlung von der Seilvorspannung zu entkoppeln. So können 4 Wirbelrohre bei über 5 bar Leitungsdruck betrieben werden. Ohne eine eigene Druckluftleitung erreichten 4 eingeschaltete Wirbelrohre einen Druck von durchschnittlich ca. 3,5 bar. Dies ermöglicht zum einen eine höhere Kühlwirkung, zum anderen unterliegt diese weniger Schwankungen.

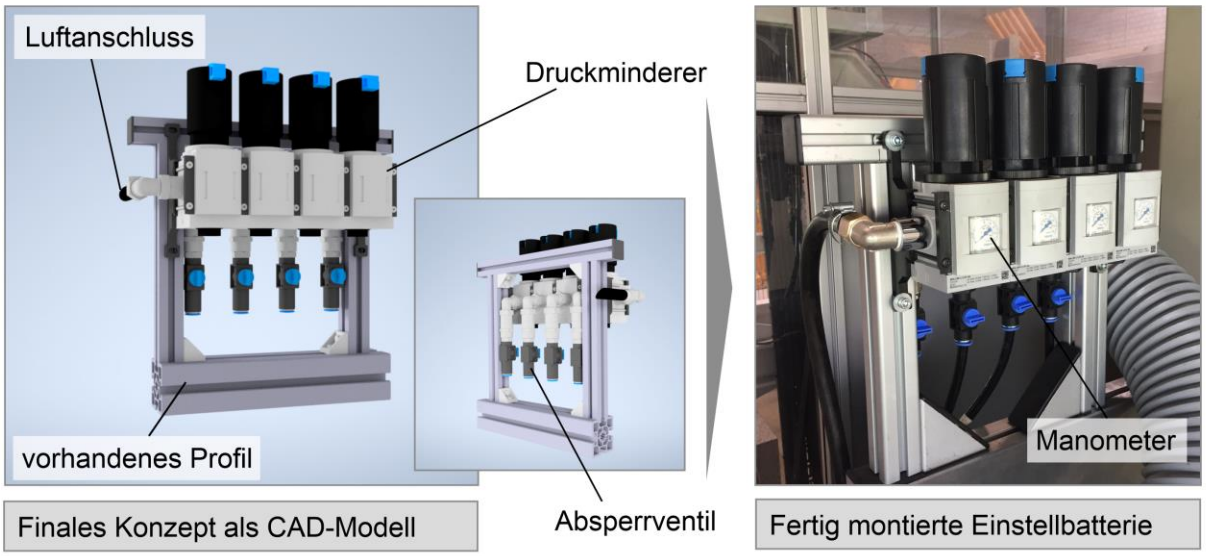


Bild 4: Aufbau der Kühleinheit

Zur Validierung des neuen Aufbaus wurde die Temperatur bei unterschiedlichen Konfigurationen der Kühldüsen mit einem PT100-Thermometer innerhalb der Kühleinheit bei 10 min Haltezeit gemessen. Die Temperatur wurde dabei am 3 Stellen gemessen und gemittelt. Die erreichte Temperatur in der Kühleinheit ist in Bild 5 zu erkennen. Zu erkennen ist, dass die minimale Temperatur in der Kühleinheit nicht, wie zunächst erwartet, bei vier eingeschalteten Wirbelrohren erreicht wird. Im Mittel ergibt sich über alle durchgeführten Messungen die günstigste Variante mit zwei eingeschalteten Wirbelrohren mit einer Temperatur innerhalb der Kühleinheit von -15,4°C. Nach Rücksprache mit dem Hersteller der Wirbelrohre zeigen diese einen deutlichen Abfall der Kühlleistung, wenn der Druck 6,9 bar unterschreitet.

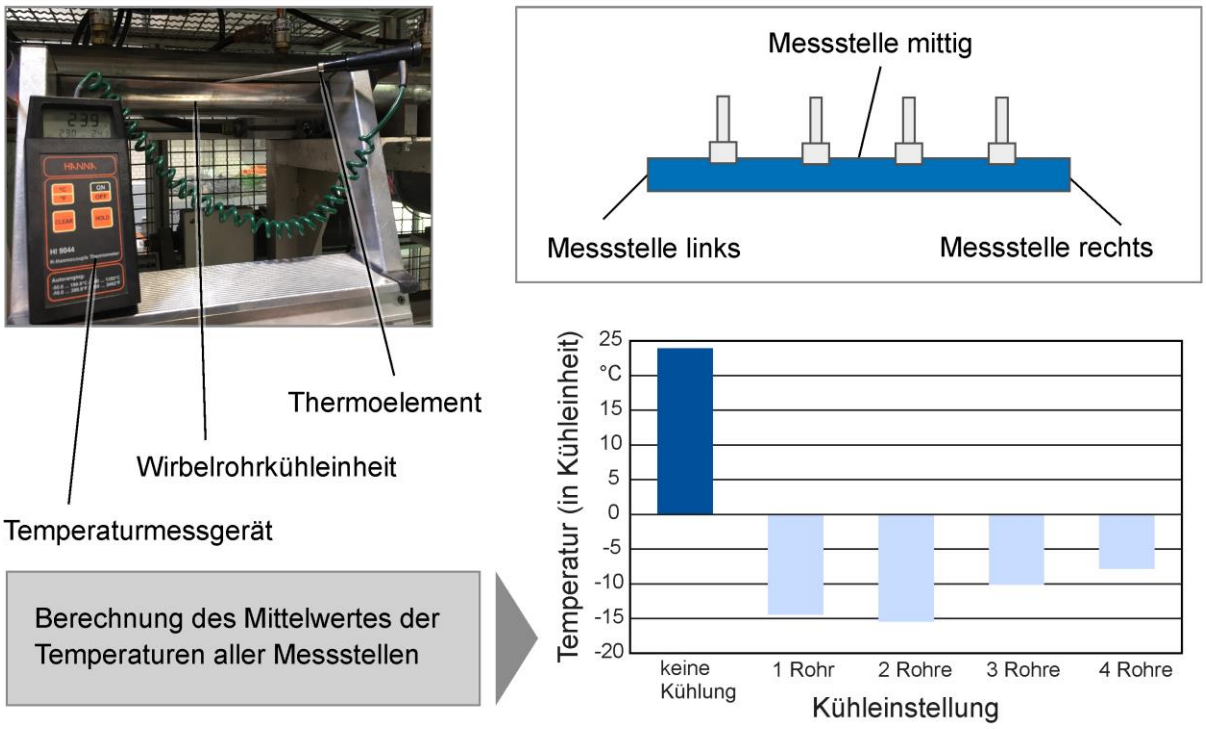


Bild 5: Erreichte Temperatur in Abhängigkeit der Kühldüsenkonfiguration

Es wurde zur Erklärung der Ergebnisse deshalb der Druck dokumentiert und in Tabelle 1 dargestellt. Es zeigt sich, dass der geforderte Druck mit 3 und 4 eingeschalteten Wirbelrohren unterschritten wird. Mit 2 eingeschalteten Wirbelrohren liegt ein ausreichend hoher Druck vor, wodurch die geringste Temperatur bei dieser Konfiguration erklärt wird.

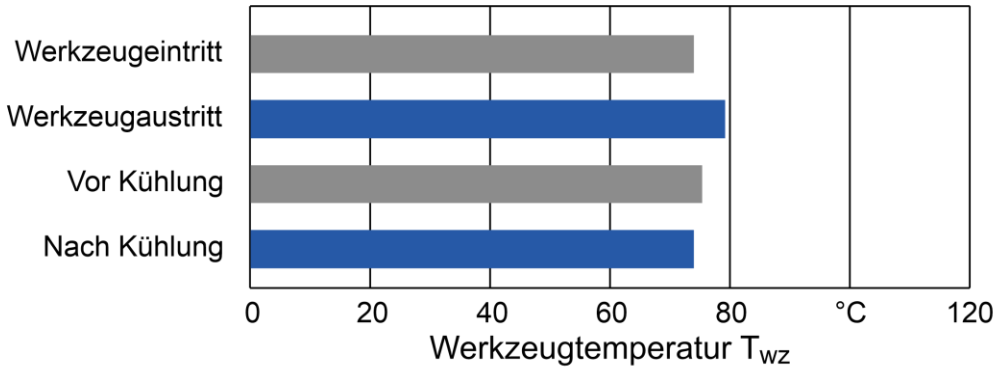
Tabelle 1: Druck am Wirbelrohr

Anzahl Wirbelrohre	Druck am Wirbelrohr in bar			
4	5	5,4	5,1	5,4
3	6,5	6,4	6,5	-
2	7,8	7,5	-	-
1	8,2	-	-	-

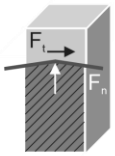
Im nächsten Schritt wurde die Werkzeuglänge, die Kühlleistung, die Vorspannkraft und die Schnittgeschwindigkeit ohne Werkzeugeingriff variiert, um Kenntnisse über den Einfluss der System- und Stellgrößen auf die Werkzeugtemperatur zu erlangen.

Zur prozessbegleitenden Messung der Werkzeugtemperatur wurde das Condition Monitoring System der Firma Grindaix verwendet. Dies ermöglicht es, die Temperatur an mehreren relevanten Stellen parallel und in Echtzeit mit hoher Auflösung zu messen. Zusätzlich ist in der nachfolgenden Auswertung ein zeitlich aufgelöster Abgleich der Temperatur mit den weiteren Prozesssignalen wie Kräfte und Maschinenleistung möglich. Es wurde

hier die Temperatur vor und hinter der Kühleinheit sowie vor und nach dem Eingriff des Werkzeugs gemessen. Dieser Verlauf ist exemplarisch in Bild 6 gezeigt. Zwar ist hier zu erkennen, dass es tendenziell einen geringfügigen Anstieg der Temperatur nach dem Werkzeugeingriff gibt, dieser ist aber bereits vor der Kühleinheit nicht mehr messbar. Zusätzlich ist hier aufgrund des Funkenflugs eine Messung nur begrenzt aussagekräftig. Dies wird darauf zurückgeführt, dass bei der sehr hohen Umlaufgeschwindigkeit des Seils nur sehr geringe Schwankungen der Temperatur innerhalb einer einzelnen Umdrehung stattfinden. Im weiteren Projektverlauf wird deshalb die mittlere Werkzeugtemperatur angegeben.



Prozessstellgrößen:	**Werkzeug:**	**Werkstück:**
v_c = 20 m/s	Husqvarna	Baustahl S355 JR
v_f = 5 mm/min	d_g = 651	
p_v = 2,5 bar	n_s = 44 1/m	
	λ = 0,22	



Hel/122555 © IFW

Bild 6: Temperaturverlauf innerhalb einer Umdrehung

Wird zunächst der Spanndruck betrachtet (siehe Bild **7** links), zeigt sich, dass mit zunehmendem Spanndruck die Werkzeugtemperatur im Leerlauf steigt. Der Anstieg kann hier als linear angenommen werden. Aufgrund des höheren Spanndrucks steigt die Reibung zwischen dem Seil und den Umlenkrollen. Jedoch wird in der Praxis trotzdem ein möglichst hoher Spanndruck eingesetzt, da dies zu einer effizienteren Zerspanung führt und dieser Effekt die höhere Reibung an den Umlenkrollen überlagert. Die Seillänge zeigt ebenfalls einen kontinuierlichen Anstieg der Temperatur mit Abnahme der Seillänge. Dieser Effekt nimmt mit höheren Spanndrücken bzw. höheren Temperaturen zu. Das umlaufende Seil gibt mittels freier Konvektion Energie an die Umgebungsluft ab und kühlt somit ab. Je länger das Seil, desto höher ist die damit realisierbare Kühlwirkung. Da die freie Konvektion abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen Seil und Umgebungsluft ist, ist die Kühlwirkung bei höherer Seiltemperatur höher. Es wurde angenommen, dass sich hier ein Optimum einstellt, ab dem eine Erhöhung der Seillänge nur noch zu einer geringfügigen Absenkung der Temperatur führt. Dies konnte im untersuchten Parameterraum nicht festgestellt werden, da die Erhöhung der Seillänge auf 13 m den größten Unterschied in der Werkzeugtemperatur bewirkt und mit dieser Seillänge eine maximale Temperatur von 32 °C erreicht wird.

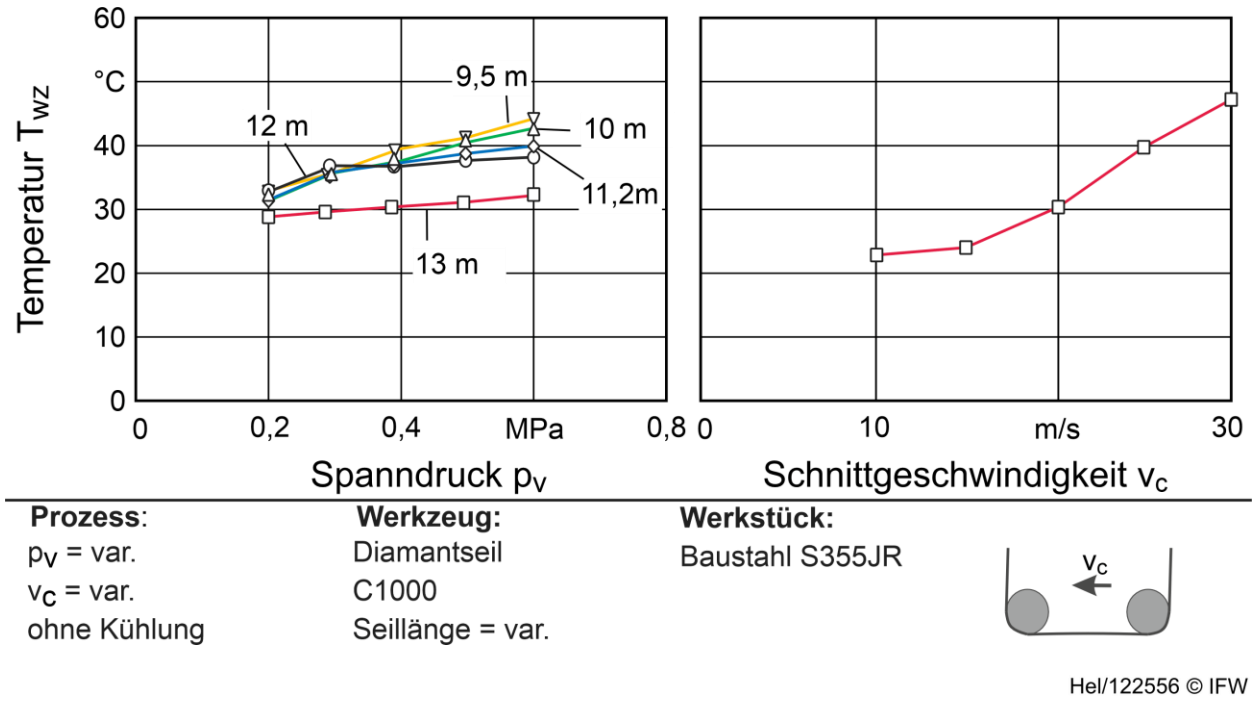


Bild 7: Einfluss der Seillänge, des Spanndrucks und der Schnittgeschwindigkeit auf die Werkzeugtemperatur

Anschließend wurde der Einfluss der Schnittgeschwindigkeit (Bild 7 rechts) analysiert. Hier wurde eine Seillänge von 13 m und ein Spanndruck von 3,9 bar eingestellt. Es zeigt sich, dass mit steigender Schnittgeschwindigkeit die Werkzeugtemperatur wie zu erwarten deutlich zunimmt. Aufgrund der höheren Schnittgeschwindigkeit steigt die Umformgeschwindigkeit an den Umlenkrollen, wodurch die innere Reibung im Seil zunimmt.

Der Einfluss der Kühlleistung ist in Tabelle 2 dargestellt. Hier zeigt sich ein zunächst unerwartetes Bild. Obwohl die Temperatur in der Kühleinheit stark von der Düsenkonfiguration abhängt, wird die Werkzeugtemperatur im Leerlauf nur geringfügig beeinflusst. Dieses Verhalten ist anhand der geringen Temperaturdifferenz zwischen Seil und Umgebung im Leerlauf im Vergleich zum tatsächlichen Schleifprozess zu erklären. Anders als über die freie Seillänge ist in der Kühleinheit die erzwungene Konvektion ausschlaggebend. Dies wird in AP 4 anhand der theoretischen Kühlleistung näher beschrieben.

Tabelle 2: Werkzeugtemperatur im Leerlauf

Anzahl Wirbelrohre	Werkzeugtemperatur [°C]
4	32,2
3	32,5
2	31,9
1	33,3
0	33,5

3.1.2 Untersuchung der Werkzeugspezifikation (AP 2)

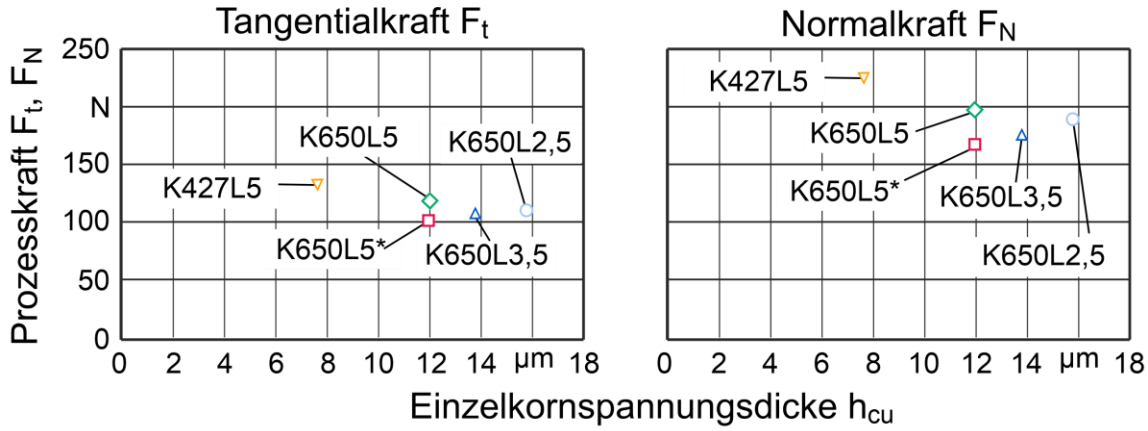
Im zweiten Arbeitspaket wurde der Einfluss der Werkzeugspezifikation auf die thermomechanische Belastung und das Verschleißverhalten analysiert. Eine Vergleichsgröße zur Beurteilung des Spanbildungsprozesses stellt die Einzelkornspanungsdicke dar. Durch eine Erhöhung der Einzelkornspanungsdicke ändert sich der Spanbildungsmechanismus. Die Spanbildung erfolgt effizienter, da ein verringerter Reibungsanteil vorliegt. Bei zu hoher Einzelkornspanungsdicke besteht die Gefahr einer thermomechanischen Überlastung der Körner, was zum Kornbruch führt.

Für die Versuche wurden in Zusammenarbeit mit der Firma Husqvarna Seile mit unterschiedlicher Segmentlänge und Korngröße hergestellt. Da der Werkzeugverguss in einer Stahlform durchgeführt wird, wurden hier die technisch möglichen Variationen umgesetzt. Somit standen Werkzeuge mit der Segmentlänge 5 mm (Referenz), 3,5 und 2,5 mm zur Verfügung. Weiterhin wurde neben der Referenzkorngröße von 651 µm ein Werkzeug mit 427 µm hergestellt. Der Einsatz einer größeren Korngröße war herstellungsbedingt nicht möglich. Stattdessen wurde ein Seil mit höherer Kornqualität (höherer Toughness Index TI) hergestellt (K650L5*). In allen Fällen handelt es sich um vakuumgelötete Seilschleifwerkzeuge. Ausgangspunkt und Referenz bildet hier das Werkzeug C100 der Firma Husqvarna. Die eingesetzten Seile und ihre im Projekt verwendete Kurzbezeichnung ist in Tabelle **3** zusammengefasst.

Tabelle 3: Eingesetzte Werkzeugspezifikationen

	K650L5	K650L3,5	K650L2,5	K427L5	K650L5*
Korngröße in µm	651	651	651	427	651
Segmentlänge in mm	5	3,5	2,5	5	5
Segmentierung	0,22	0,154	0,11	0,22	0,22

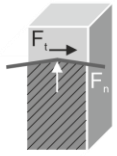
Sowohl die Segmentierung als auch die Korngröße beeinflussen die Einzelkornspanungsdicke und somit den Zerspanprozess ohne Änderung der Prozessstellgrößen. Im Folgenden wurden die Seile mit einer Seillänge von 13 m und einer Kühlkonfiguration mit 2 Düsen entsprechend der Ergebnisse des Arbeitspakets 1 eingesetzt. Als Prozessstellgrößen wurde eine Schnittgeschwindigkeit von 20 m/s und eine Vorschubgeschwindigkeit von 5 mm/min verwendet.



Prozessstellgrößen:
v_c = 20 m/s
v_f = 5 mm/min
p_v = 2,5 bar

Werkzeug:
Husqvarna
d_g = var.
n_s = 44 1/m
λ = var.

Werkstück:
Baustahl S355 JR



Hel/122557 © IFW

Bild 8: Prozesskräfte in Abhängigkeit der Werkzeugspezifikation

Die resultierenden Prozesskräfte sind in Bild 8 gezeigt. Bei konstanten Prozessstellgrößen zeigt sich, dass sich die Einzelkornspanungsdicke nur anhand der Korngröße und der Segmentlänge zwischen 7,8 und 15,7 µm variieren lässt. Die geringsten Kräfte weist dabei das Seil mit der geänderten Diamantkornqualität auf, da dieses ein regelmäßigeres Korn mit weniger Fehlstellen bietet und somit schärfere Schneiden. Den größten Einfluss auf die Prozesskräfte besitzt die Korngröße. Eine Verringerung der Korngröße auf 427 µm führt zu einem Anstieg von ca. 14 % gegenüber der Referenz. Aufgrund der höheren Anzahl an Körnern kommt es mit geringerer Einzelkornspanungsdicke zu vermehrter elastischer Verdrängung und Reibung zwischen Korn und Werkstück. Dies führt zu einer Abnahme der Effizienz der Werkstofftrennung und damit zu einer Zunahme der Prozesskräfte.

Unter Ausschluss der Kornqualität, da dies einen Sonderfall darstellt, lässt sich hier ein klarer Trend erkennen. Mit zunehmender Einzelkornspanungsdicke nehmen die Prozesskräfte bei gleichen Prozessstellgrößen ab, was auf die gesteigerte Effizienz des Schleifprozesses hindeutet. Als Bestätigung dieser Annahme wird die spezifische Schleifenergie berechnet. Diese gibt an, wieviel Energie pro abgetragenem Volumen aufgewendet wird und spiegelt somit die Effizienz des Schleifprozesses wider. Dieses ist für alle Werkzeuge in Bild 9 abgebildet. Die Werkzeuge sind nach zunehmender Einzelkornspanungsdicke sortiert. Hier zeigt sich, dass das Seil K650L2,5 eine Verringerung der Schleifenergie von ca. 6 % gegenüber der Referenz aufweist.

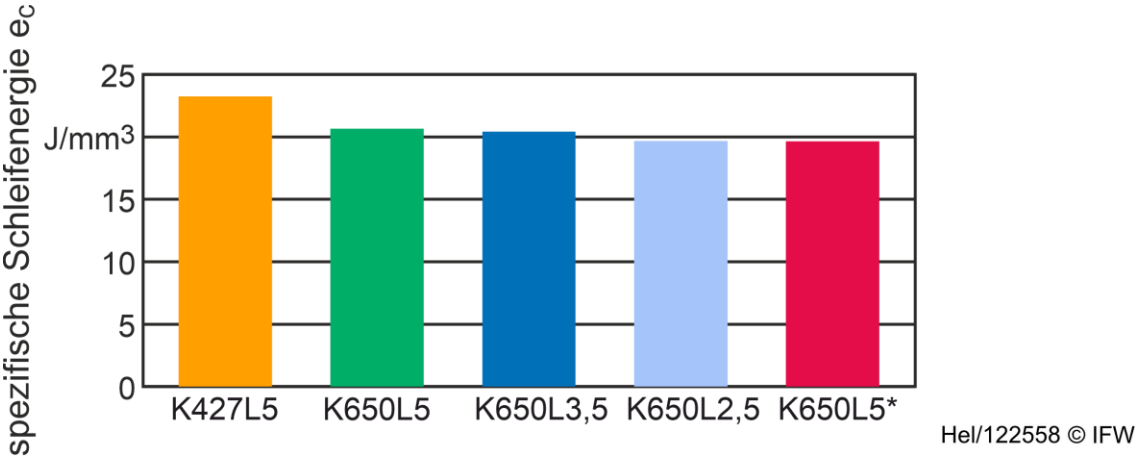
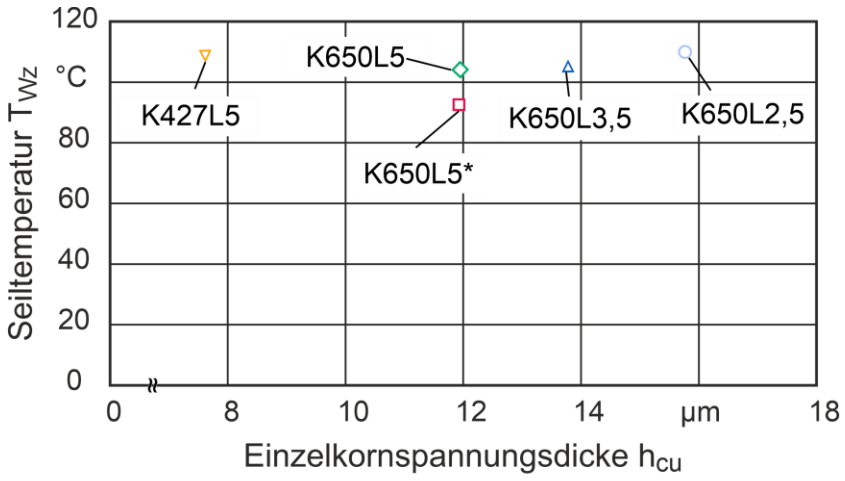


Bild 9: Spezifische Schleifenergie

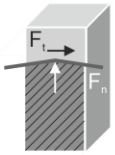
Analog zu den Prozesskräften wurde die Werkzeugtemperatur gemessen. Diese ist in Bild 10 gezeigt. Der in den Kräften erkennbare Trend ist hier nur bedingt wiederzufinden. Das Seil K650L5* zeigt hier die geringste Temperatur mit 93 °C. Das Seil mit der geringeren Korngröße zeigt hier die höchste gemessene Temperatur mit 109 °C. Allerdings ist in der Temperatur kein klarer Trend in Abhängigkeit der Einzelkornspanungsdicke zu erkennen. Besonders die Seile mit variierender Segmentlänge sind hier auf einem vergleichbaren Niveau.



Prozessstellgrößen:
v_c = 20 m/s
v_f = 5 mm/min
p_v = 2,5 bar

Werkzeug:
Husqvarna
d_g = var.
n_s = 44 1/m
λ = var.

Werkstück:
Baustahl S355 JR



Hel/122559 © IFW

Bild 10: Werkzeugtemperatur in Abhängigkeit der Werkzeugspezifikation

Abschließend wurde das Verschleißverhalten der Werkzeuge ermittelt. Hierzu wurden die Werkzeuge eingesetzt, bis es zum Erreichen eines standzeitlimitierenden Faktors kam. Dies war in allen Fällen das Versagen der Werkzeuggummierung. Aufgrund der thermischen Beanspruchung der Gummierung kommt es zu einer Versprödung des Gum-

mis und zum Abplatzen einzelner Bereiche. Dies hat zur Folge, dass einzelne Schleifsegmente nicht auf dem Trägerseil fixiert sind. Es kommt zum Aufschieben der Segmente, wodurch das Trägerseil freigelegt wird. Dies wurde als Standzeitkriterium festgelegt.

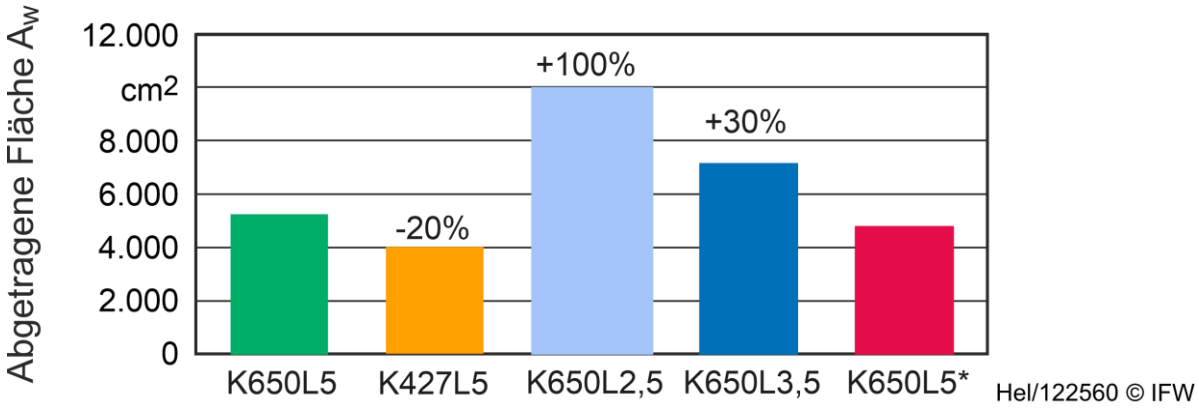


Bild 11: Erreichte Standfläche

Die Ergebnisse in Bild 11 zeigen zunächst das erwartete Ergebnis, dass die Standfläche des Seils mit geringer Korngröße 20 % unterhalb der Referenz liegt. Dies geht mit den gemessenen Prozesskräften bei diesem Werkzeug einher. Obwohl das Werkzeug K650L5* zunächst die geringsten Prozesskräfte aufwies, liegt die Standfläche geringfügig unterhalb der Referenz. Zwar weist dieses Werkzeug im unverschlissenen Zustand geringere Kräfte auf, diese sind jedoch mit der Zeit stärker angestiegen als bei dem Referenzwerkzeug. Dies führt letztendlich zum früheren Werkzeugversagen. Aufgrund der höheren Schlagfestigkeit des Diamanten ändert sich bei diesem Werkzeug das Verschleißverhalten. Während die Diamanten üblicherweise anflachen und splittern, wodurch neue scharfe Schneiden entstehen können, überwiegt beim Werkzeug K650L5* das Anflachen. Durch dieses Verrunden der Schneiden steigt die Reibung im Prozess überproportional und bedingt die insgesamt geringere Standfläche gegenüber der Referenz.

Der Einfluss der Segmentlänge ist hier hoch signifikant. Die vorherigen Ergebnisse haben bereits gezeigt, dass hier mit geringerer Segmentlänge eine effizientere Zerspanung stattfindet. Insgesamt zeigt sich, dass die Standfläche bei einer Segmentlänge von 3,5 mm um 30 % und bei einer Segmentlänge von 2,5 mm sogar um 100 % zunimmt. Dieses Ergebnis wurde durch zusätzlich durchgeführte Wiederholversuche bestätigt. Die Betrachtung des Kornverschleißes zum Versuchsende bestätigt die Ergebnisse. In Bild 12 ist mittig das Referenzwerkzeug dargestellt. In Schnittrichtung bildet sich hier ein angeflachter Bereich der Bindung aus. Hier sind Eingriffsspuren ersichtlich. Dies bedeutet, dass hier mit zunehmendem Verschleiß verstärkt Bindungsreibung auftritt, wodurch die thermische Belastung steigt. Eine mögliche Erklärung ist, dass aufgrund des Eingriffswinkels des Seils die Segmente nicht vollständig parallel zur Werkstückoberfläche liegen und somit nicht das vollständige Segment gleichzeitig im Eingriff ist. Es werden also die Diamanten entlang des Segments unterschiedlich stark beansprucht, wodurch die Leistungsfähigkeit begrenz wird. Dieser Effekt ist bei den Seilen mit verringerter Segmentlänge nicht zu beobachten. Hier kommt es nicht zur Ausbildung eines angeflachten Bindungsbereichs, weshalb die Segmente auch mit höherer Einsatzzeit effizienter arbeiten und somit eine erhöhte Leistungsfähigkeit aufweisen.

Zudem bestätigt sich für das Werkzeug K650L5*, dass hier auch am Versuchsende fast keine gesplitterten Körner zu erkennen sind. Dies bestätigt zwar die hohe Qualität und Schlagfestigkeit der Diamanten, verhindert hier aber das Erzeugen neuer scharfer Schneiden, wodurch die Standfläche begrenzt wird.

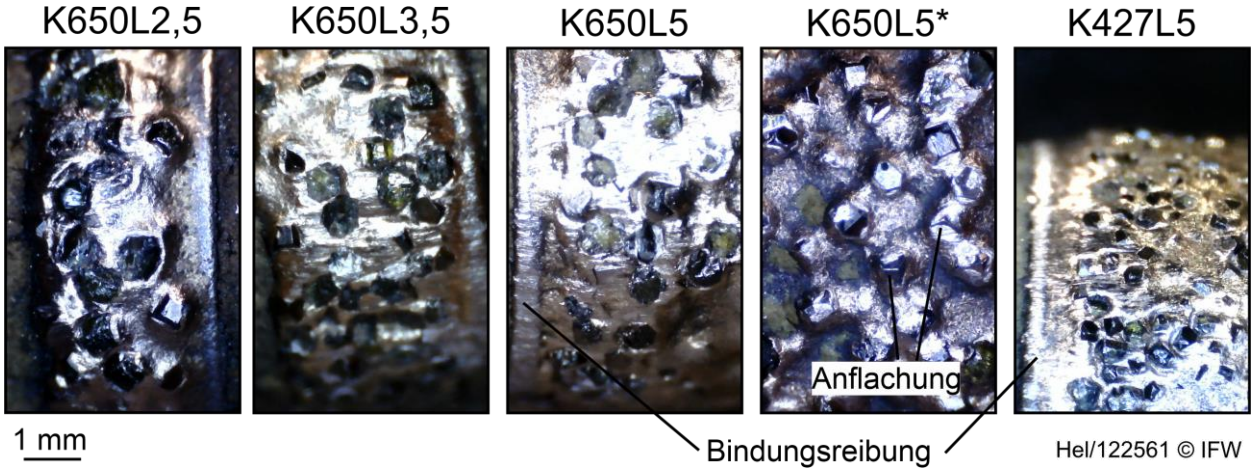
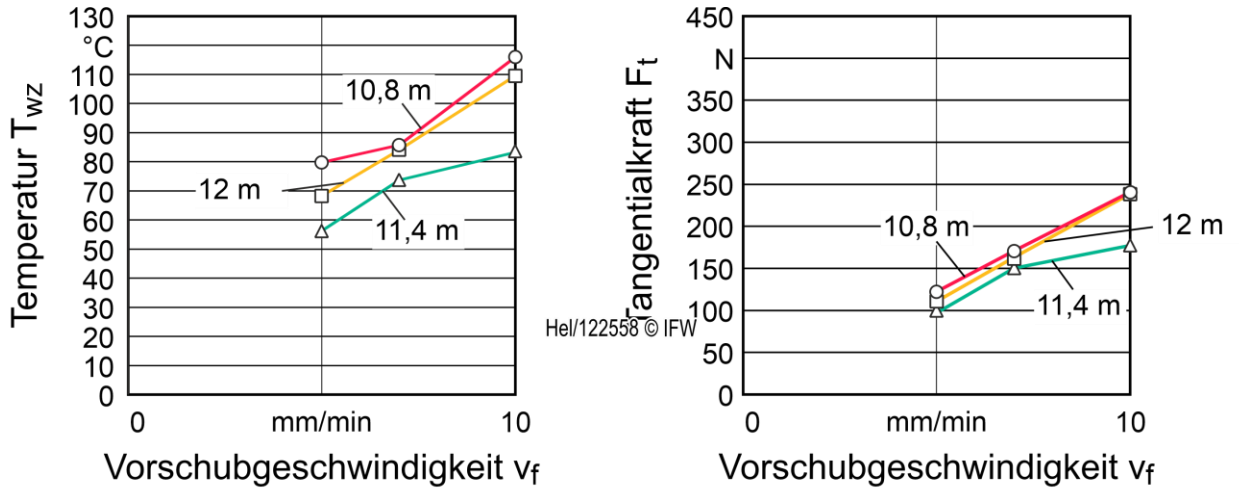


Bild 12: Kornverschleiß

3.1.3 Einsatz- und Verschleißverhalten (AP 3)

In diesem Arbeitspaket werden die Zusammenhänge zwischen den in Arbeitspaket 1 untersuchten thermischen Einflussgrößen und dem Einsatz- und Verschleißverhalten beim trockenen Seilschleifen von Stahl untersucht. Aufgrund der herausfordernden Herstellung der Prototypenseile in AP 2 wurde der Einfluss der Werkzeuglänge und der Kühlung auf das Einsatzverhalten zunächst mit Referenzseilen untersucht. Zur anschließenden Untersuchung des Parameterraums wurden aufgrund der vielversprechenden Ergebnisse in AP 2 nicht wie geplant das leistungsfähigste Seil ausgewählt, sondern alle 5 Seile untersucht. Der dadurch entstandene Mehraufwand übersteigt den Ausfall der Versuche auf dem Analogieprüfstand.

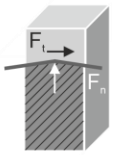
Zunächst wurde die Werkzeuglänge im größtmöglichen Bereich variiert, indem noch ein vollständiger Schnitt im Stahlblock gegeben ist. Um unterschiedliche Belastungszustände abzubilden wurde hier zusätzlich die Vorschubgeschwindigkeit gesteigert. Die resultierende Werkzeugtemperatur ist Bild 13 zu sehen. Hier zeigt sich zunächst bei der Erhöhung der Seillänge auf 11,4 m eine Verringerung der Werkzeugtemperatur. Jedoch steigt diese mit nochmals gesteigerter Seillänge wieder an. Eine mögliche Ursache ist die prozessbedingte hohe Anfälligkeit des Seilschleifens für Schwingungen und ein möglicher ungünstiger Schwingungszustand bei einer Seillänge von 12 m, der in den Untersuchungen im Leerlauf nicht aufgetreten ist. Darauf deutet ebenfalls die dargestellte Tangentialkraft hin. Diese ist vor allem bei hoher Vorschubgeschwindigkeit bei 10,8 und 12 m deutlich erhöht, was auf einen nicht optimalen Prozess hindeutet. Es zeigt sich hier, dass die Werkzeuglänge zwar einen Einfluss auf die Werkzeugtemperatur besitzt, dieser Effekt jedoch durch ungünstige Prozessbedingungen überlagert werden kann. Mit steigender Vorschubgeschwindigkeit nimmt insgesamt die Werkzeugtemperatur signifikant zu. Dies ist auf die dadurch steigende Einzelkornspanungsdicke zurückzuführen. Mit steigender Vorschubgeschwindigkeit nimmt somit die mechanische Belastung im Prozess zu, wodurch die Reibung steigt und damit die Prozesstemperatur.



Prozessstellgrößen:
v_c = 20 m/s
v_f = var.
p_v = 2,5 bar

Werkzeug:
Husqvarna
d_g = 651 µm
n_s = 44 1/m
λ = 0,22

Werkstück:
Baustahl S355 JR



Hel/122562 © IFW

Bild 13: Einfluss der Werkzeuglänge und Vorschubgeschwindigkeit auf das Einsatzverhalten

Anschließend wurden Standzeituntersuchungen bei unterschiedlichen Prozessstellgrößen untersucht, um die Leistungsgrenze der Referenzwerkzeuge zu ermitteln. Der Fokus lag auf der Auswertung des Verschleißverhaltens der Werkzeuge. Dazu wurden mittels Mikroskop kontinuierlich die Schleifsegmente und die Gummierung zwischen den Segmenten untersucht.

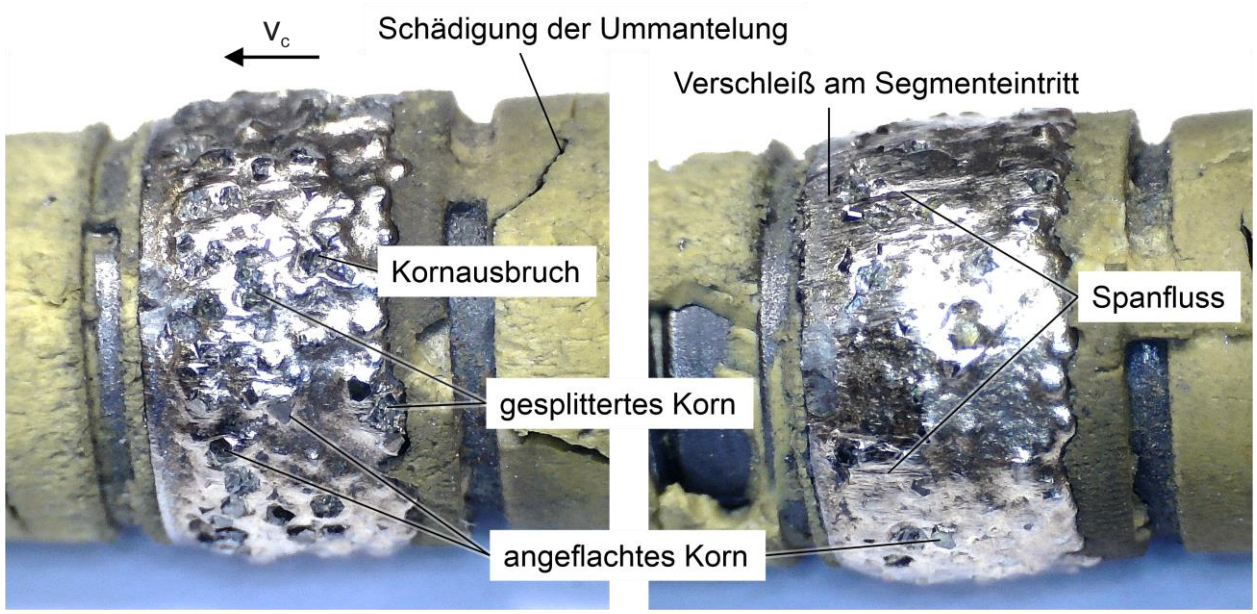
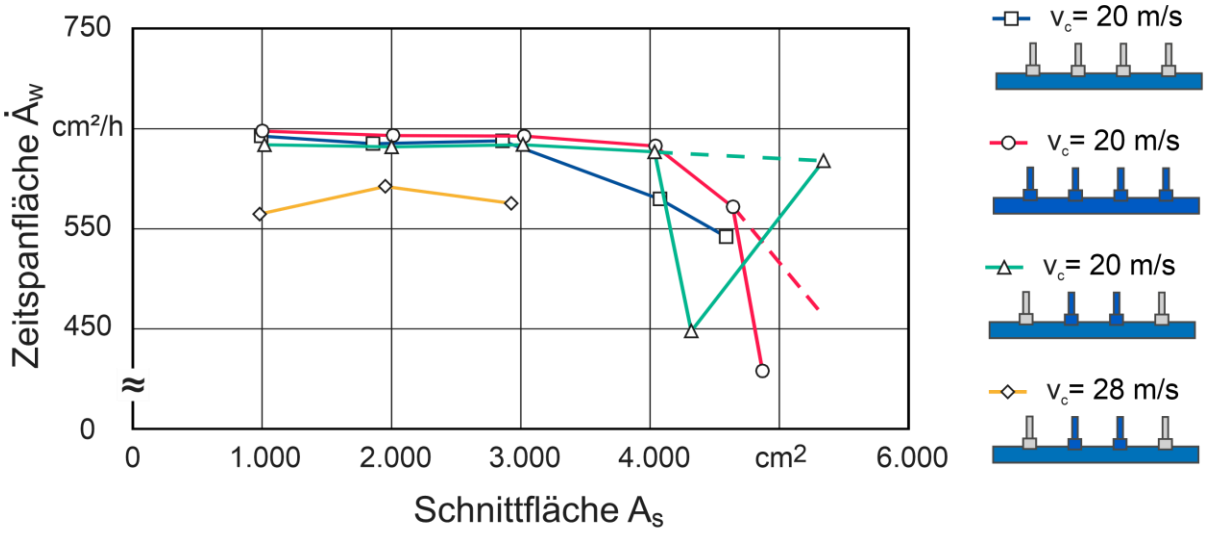


Bild 14: Vergleich der Schleifsegmente bei unterschiedlicher Vorschubgeschwindigkeit

Im Vergleich zeigt sich, dass mit 5 mm/min bereits die Leistungsfähigkeit der Werkzeuge erreicht wird. Die Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit auf 7 mm/min führt dazu, dass bereits nach ca. 3.500 cm² die Schleifsegmente nicht mehr einsatzfähig sind. Bei hoher Vorschubgeschwindigkeit kommt es hier zum starken Abnutzen der einschichtigen Schleifsegmente, wodurch es zu einem sehr starken Reibungs- und Kraftanstieg kommt und das Werkzeug früh versagt. Der Vergleich der Schleifsegmente ist in Bild 14 exemplarisch für eine Schnittfläche von 3.500 cm² gezeigt.

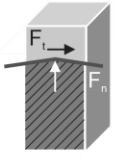
Im Anschluss wurde der Einfluss der Kühlleistung auf das Einsatz- und Verschleißverhalten ermittelt. Dafür wurden Standzeituntersuchungen durchgeführt bei den Kühlzuständen 0 Düsen, 2 Düsen und 4 Düsen. Dabei zeigt sich in Bild 15, dass bei einer Schnittgeschwindigkeit von 20 m/s die Zeitspanfläche zunächst konstant bei ca. 650 cm²/h liegt. Je nach Kühlzustand fällt die Zeitspanfläche ab einer spezifischen Schnittfläche ab. Dies ist auf den mikroskopischen Verschleiß der Segmente zurückzuführen, wodurch das Seil im Laufe der Einsatzzeit seine Schnittfähigkeit verliert. Es zeigt sich, dass dies ohne Kühlung bereits bei einer Schnittfläche von 3.000 cm² geschieht. Hier erreicht das Seil auch die geringste Standfläche. Die höchste Standfläche bei nahezu gleichbleibender Zeitspanfläche erreicht das Seil beim Kühlzustand mit 2 Düsen. Der kurze Abfall der Zeitspanfläche bei 4.300 cm² ist auf ein Versagen des Verbinders zurückzuführen und nicht auf die Schnittfähigkeit des Seils. Somit wird die höchstmögliche Produktivität und höchste Standfläche mit 2 Kühldüsen erreicht und nicht mit 4 Düsen. Dies liegt an der Druckluftverteilung innerhalb der Kühleinheit. Teilt sich die zugeführte auf 4 Düsen auf, kommt es zu einem Druckabfall im einzelnen Wirbelrohr, wodurch die Effizienz der Kühlung abnimmt.



Prozessstellgrößen:
v_c = 20 m/s
v_f = 5 mm/min
p_V = 2,5 bar

Werkzeug:
Husqvarna
d_g = 651 µm
n_s = 44 1/m
λ = 0,22

Werkstück:
Baustahl S355 JR



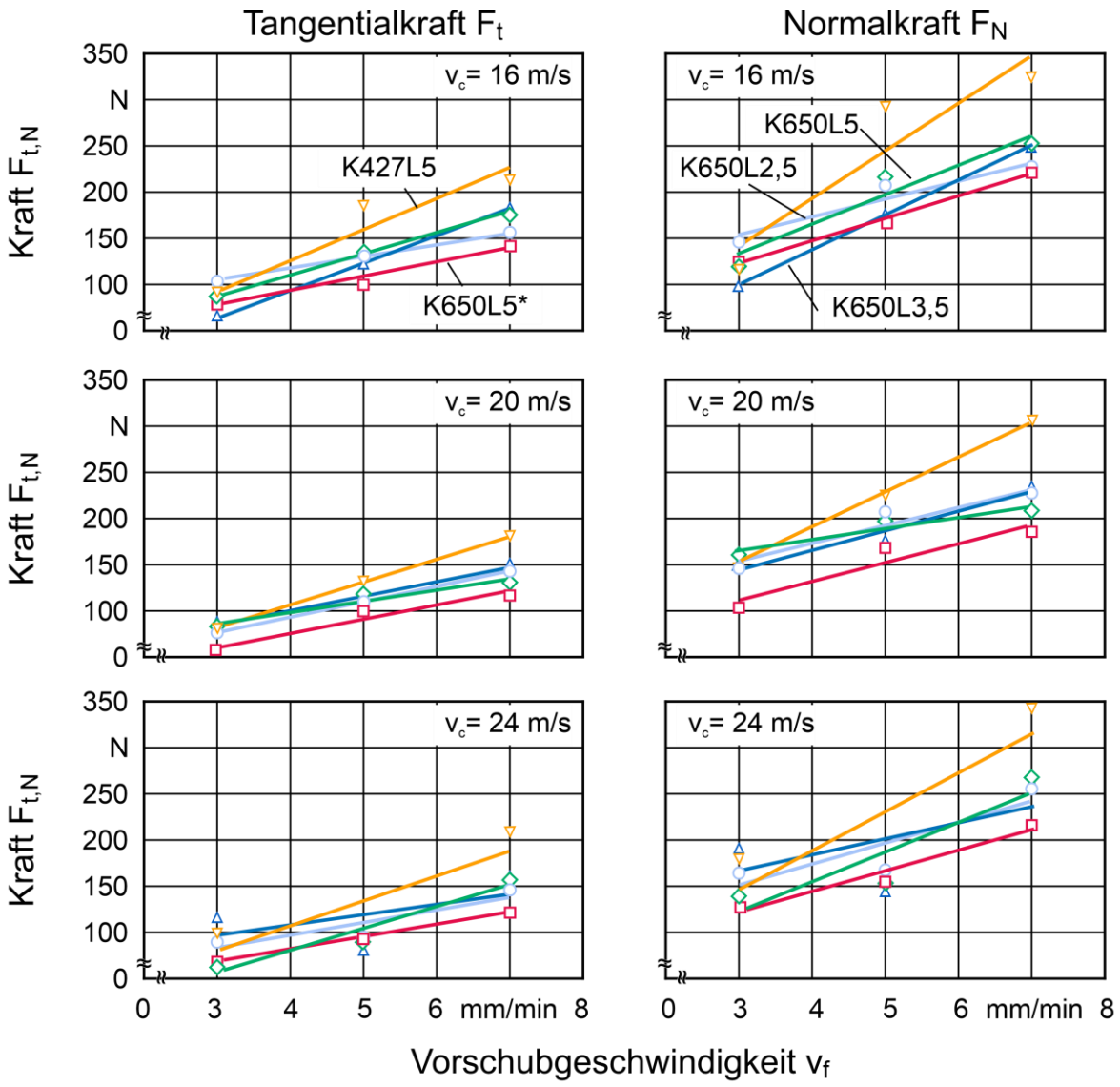
Hel/122563 © IFW

Bild 15: Einfluss der Kühlung auf die Zeitspanfläche

Weiterhin ist zu beobachten, dass bei einer Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit auf 28 m/s die Zeitspanfläche deutlich geringer ist und das Seil bereits bei 3.000 cm² sein Standzeitende erreicht. Mit Zunahme der Schnittgeschwindigkeit nimmt die Einzelkornspanungsdicke ab, wodurch hier die Mindestspanungsdicke unterschritten wird. Dies führt dazu, dass keine effiziente Spanbildung mehr stattfindet und es zu stark ausgeprägtem Kornverschleiß und Abnahme der Schnittfähigkeit kommt.

Zur Untersuchung geeigneter Prozessfenster mit optimierter Kühlung und optimierter Werkzeugspezifikation wurden anschließend die ausschlaggebenden Prozessstellgrößen Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeit variiert. Zusammenfassend ist das Einsatzverhalten in Bild 16 anhand der Prozesskräfte dargestellt. Hier werden die Trends der vorangegangenen Untersuchungen bestätigt. Eine Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit bis 7 mm/min führt zu einer deutlichen Steigerung der Prozesskräfte. Dieser Trend ist am stärksten für das Werkzeug K427L5. Aufgrund der geringeren Korngröße sind die Spanräume des Werkzeugs geringer. Dadurch wird die Leistungsgrenze dieses Werkzeugs früher erreicht. Es kommt zu vermehrter Reibung zwischen der Bindung und dem Werkstück, wodurch die Prozesskräfte stark steigen. Der Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf die Prozesskräfte ist im untersuchten Parameterfenster insgesamt nicht dominant. Es ist jedoch zu erkennen, dass bei einer Schnittgeschwindigkeit von 20 m/s besonders bei hoher Vorschubgeschwindigkeit die geringsten Kräfte auftreten.

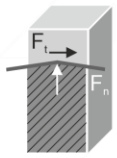
Das Werkzeug mit geringerer Korngröße zeigt insgesamt die höchsten Prozesskräfte. Dies bestätigt die vorherigen Ergebnisse, dass dieses Werkzeug die geringste Effizienz aufweist. Zur tiefergehenden Analyse des Einflusses der weiteren Werkzeugspezifikationen auf das Einsatzverhalten wurde zusätzlich eine Analyse der resultierenden Einzelkornspanungsdicke durchgeführt. Diese wird durch das Werkzeug und die Prozessstellgrößen beeinflusst. Zusammenfassend sind in die Prozesskräfte über der resultierenden Einzelkornspanungsdicke in Bild 17 dargestellt.



Prozessstellgrößen:
v_c = var.
v_f = var.
p_v = 2,5 bar

Werkzeug:
Husqvarna
d_g = var.
n_s = 44 1/m
λ = var.

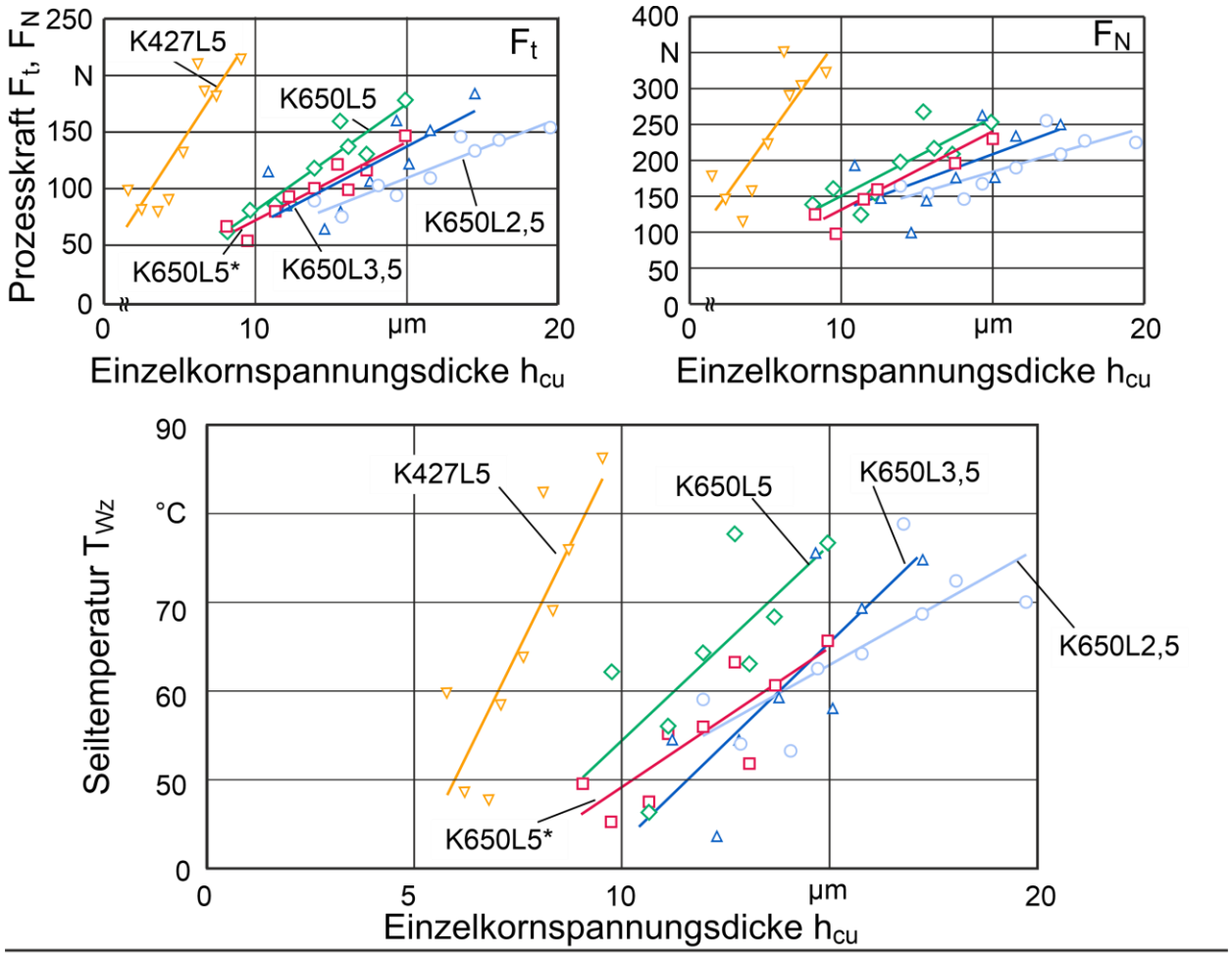
Werkstück:
Baustahl S355 JR



Hel/122564 © IFW

Bild 16: Einsatzverhalten bei unterschiedlichen Prozessstellgrößen

Hier wird das unterschiedliche Einsatzverhalten deutlich. Sowohl die Prozesskräfte als auch die Werkzeugtemperatur nimmt mit steigender Einzelkornspanungsdicke annähernd linear zu. Die Steigung der linearen Ausgleichsfunktion ist jedoch vom Werkzeug abhängig und korreliert mit den bereits erreichten Standflächen (vgl. Bild 11). Je höher die erreichte Standfläche, desto geringer ist der Anstieg über der Einzelkornspanungsdicke. Besonders auffällig ist hier, dass das Seil K650L2,5 bei höheren Einzelkornspanungsdicken deutlich verringerte Kräfte gegenüber der Referenz aufweist. Dies gilt ebenfalls für die Werkzeugtemperatur. Daraus lässt sich schließen, dass dieses Werkzeug gegenüber der Referenz eine deutlich höhere Leistungsreserve aufweist und erklärt somit die um 100 %gesteigerte erreichte Standfläche.



Prozessstellgrößen:

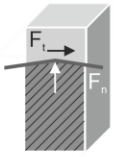
v_c = var.
v_f = var.
p_V = 2,5 bar

Werkzeug:

Husqvarna
d_g = var.
n_s = 44 1/m
λ = var.

Werkstück:

Baustahl S355 JR



Hel/122565 © IFW

Bild 17: Einfluss der Einzelkornspanungsdicke auf Prozesskräfte und Temperatur

3.1.4 Modellierung des Seilschleifprozesses (AP 4)

Ziel dieses Arbeitspakets ist es, die thermodynamischen Zusammenhänge im Seilschleifprozess tiefergehend zu verstehen. Es wurde bereits festgestellt, dass die Druckluftkühlung eine Erhöhung der erreichten Standfläche von 16 % erreicht hat. Um zu überprüfen, in welcher Größenordnung die maximal mögliche Kühlwirkung der Kühleinheit im vorliegenden Versuchsaufbau liegt, wurde diese analytisch betrachtet und modelliert. Innerhalb der Kühleinheit wird eine niedrige Temperatur erzeugt. Über das Prinzip der Konvektion soll das Werkzeug beim Passieren der Kühleinheit Wärme abgeben. Grundsätzlich wird die Energieübertragung zwischen einem Fluid und einem Körper (bzw. zwei Fluiden) aufgrund von Temperaturunterschieden als Konvektion bezeichnet. Zu unterscheiden sind dabei die freie und die erzwungene Konvektion. Die freie Konvektion kommt zustande, wenn die Fluidbewegung durch Dichteunterschiede ausgelöst wird. Wird das

Fluid beispielsweise über eine Pumpe in Bewegung versetzt spricht man von einer erzwungenen Konvektion. In der Regel liegt neben einer erzwungenen Konvektion auch immer ein Anteil einer freien Konvektion vor. Eine Abgabe der Wärme des Werkzeuges in Form von Wärmestrahlung wird an dieser Stelle nicht berücksichtigt, da die Wärmestrahlung nur von der Werkzeugtemperatur und nicht von der Umgebungstemperatur abhängt. Zudem ist die Durchlauflänge der Kühleinheit sehr kurz im Vergleich zur Werkzeuglänge und die Wärmestrahlung innerhalb der Kühleinheit deshalb geringfügig.

Der durch die Konvektion erzeugte Wärmestrom wird über das Newtonsche Wärmeübergangsgesetz

$$\dot{\boldsymbol{Q}} = \boldsymbol{\alpha} \cdot \boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{\Delta T} \tag{3.1}$$

berechnet. Dabei beschreibt α den Wärmeübergangskoeffizienten, A die Mantelfläche des Körpers und ΔT die Temperaturdifferenz zwischen Fluidtemperatur und Temperatur des Körpers. Mit steigender Werkzeugtemperatur steigt demnach der Wärmestrom, welcher durch Konvektion erzeugt wird.

Wie zuvor erwähnt, gibt es zwei Möglichkeiten der Konvektion. Für beide Arten der Konvektion ergeben sich unterschiedliche Berechnungsvorschriften für den Wärmeübergangskoeffizienten α. Im Folgenden werden freie und erzwungene Konvektion betrachtet und anschließend die Wärmeübertragung bei einer Überlagerung beider Konvektionsarten berechnet. Für die Wärmeübertragung mittels freier Konvektion wird vereinfacht angenommen, dass die Kühleinheit einem Raum mit einer konstanten Lufttemperatur ϑ_∞ von -20°C entspricht. Das Seilschleifwerkzeug wird als horizontaler Zylinder in diesem Raum betrachtet. Die Temperatur des Werkzeuges ϑ_W wird mit 100°C angenommen, da höhere Werkzeugtemperaturen aufgrund der erhöhten Schädigung der Werkzeugummantelung vermieden werden sollten. Die charakteristische Länge L ergibt sich aus dem Werkzeugdurchmesser von 10 mm. Der Wärmeübergangskoeffizient bei freier Konvektion ergibt sich aus der Gleichung:

$$\boldsymbol{\alpha_f} = \frac{\boldsymbol{\lambda_m Nu}}{\boldsymbol{\mathcal{L}}} \tag{3.2}$$

Für die Berechnung der dimensionslosen Nusselt-Zahl gilt bei freier Konvektion:

$$\boldsymbol{Nu} = \left(\mathbf{0,6} + \frac{\mathbf{0,387} \boldsymbol{Ra}^{\frac{1}{6}}}{\left[\mathbf{1} + (\mathbf{0,559} / \boldsymbol{Pr})^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right)^{\mathbf{2}} \tag{3.3}$$

Die Rayleigh-Zahl ergibt sich aus dem Produkt der Grashof-Zahl und der Prandtl-Zahl:

$$\boldsymbol{Ra} = \boldsymbol{Gr} \cdot \boldsymbol{Pr} \tag{3.4}$$

Die Grashof-Zahl wird über folgende Gleichung berechnet:

$$Gr = \frac{\beta_\infty g \mathcal{L}^3 |\vartheta_w - \vartheta_\infty|}{\nu^2} \quad (3.5)$$

Für alle weiteren fehlenden Größen wurden Werte aus dem VDI Wärmeatlas entnommen. Dabei ist darauf zu achten, welche Bezugstemperatur für die jeweilige Größe gilt. Es ergibt sich für die freie Konvektion ein Wärmeübergangskoeffizient α_f von ungefähr 10,9 W/m²K. Eingesetzt in Gleichung (5.1) erhält man einen Wärmestrom von 41,06 W.

Anders als in der ersten Annahme handelt es sich bei der Wirbelrohrkühleinheit jedoch nicht um eine Kammer ohne Luftströmung in der eine reine freie Konvektion auftreten würde. Vielmehr wird durch die Wirbelrohre eine Luftströmung mit hoher Geschwindigkeit erzeugt. Daher wird bei der zweiten Rechnung der Fall der erzwungenen Konvektion an einem querumströmten kreisförmigen Zylinder berechnet. Es wird die vereinfachte Annahme getroffen, dass sich der Luftstrom gleichmäßig über die gesamte Kühleinheit aufteilt und nicht punktuell an den Öffnungen der Wirbelrohre.

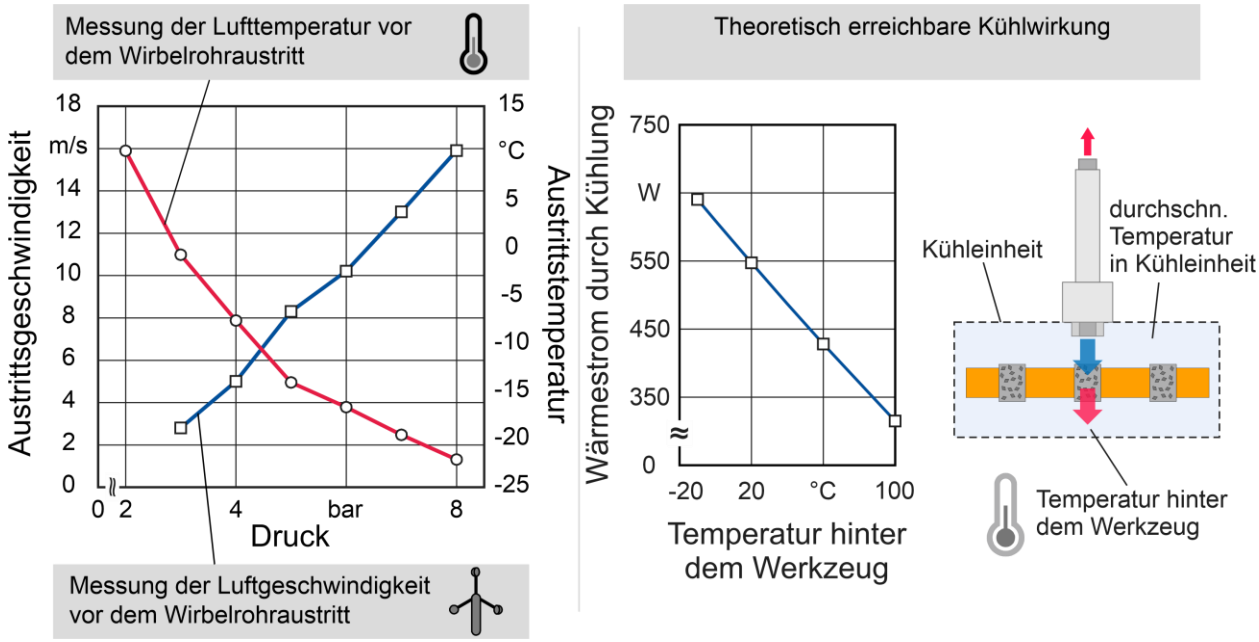


Bild 18: Modellierung der theoretischen Kühlleistung

Da die Berechnung der Austrittsgeschwindigkeit der Luft aus den Wirbelrohren weitere Vereinfachungen und somit Ungenauigkeiten in die Rechnung einbringen würde, wurde eine Geschwindigkeitsmessung am Austritt des Wirbelrohres mit Hilfe eines Anemometers durchgeführt. Zusätzlich wurden Temperaturmessungen direkt vor dem Kaltluftaustritt des Wirbelrohrs vorgenommen. Die Ergebnisse sind in Bild 18 links zu sehen. Es wird die starke Abhängigkeit der Kühlwirkung mit dem anliegenden Druck deutlich. Mit steigendem Druck im Wirbelrohr nimmt die Austrittsgeschwindigkeit deutlich zu, während die Lufttemperatur deutlich abnimmt. Es wird mit einer Luftgeschwindigkeit von 15 m/s bei einer Temperatur von -20°C angenommen.

Anders als bei der freien Konvektion gelten für Fälle, bei denen erzwungene Konvektion auftritt folgende Gleichungen für die Reynoldszahl und die Prandtl-Zahl:

$$\boldsymbol{Re} = \frac{\boldsymbol{w_l \mathcal{L}}}{\boldsymbol{\nu}} \tag{3.6}$$

und

$$\boldsymbol{Pr} = \frac{\boldsymbol{\nu}}{\boldsymbol{a}} = \frac{\boldsymbol{\eta c_p}}{\boldsymbol{\lambda}} \tag{3.7}$$

Die Austrittsgeschwindigkeit wird mit w_l bezeichnet, um Verwechslungen mit der kinematischen Viskosität v zu vermeiden. Alternativ zur Berechnung mit Gleichung 3.7 kann die Prandtl-Zahl auch aus Kennwerttabellen entnommen werden. Die charakteristische Länge ist für den betrachteten Fall als halbe Umfangslänge um den Zylinder, im Falle der Werkzeugkühlung um das Werkzeug, definiert. Für die erzwungene Konvektion um einen horizontalen Zylinder gilt folgender Zusammenhang:

$$\boldsymbol{Nu} = \frac{\boldsymbol{\alpha_e \mathcal{L}}}{\boldsymbol{\nu}} = \boldsymbol{0,3} + \sqrt{\boldsymbol{Nu_{lam}^2 + Nu_{turb}^2}} \tag{3.8}$$

mit

$$\boldsymbol{Nu_{lam}} = \boldsymbol{0,664 Re^{1/2} Pr^{1/3}} \tag{3.9}$$

und

$$\boldsymbol{Nu_{turb}} = \frac{\boldsymbol{0,037 Re^{0,8} Pr}}{\boldsymbol{1 + 2,443 Re^{-0,1} (Pr^{2/3} - 1)}} \tag{3.10}$$

Als Bezugstemperatur wird die mittlere Temperatur ϑ_m als Mittelwert ein zu- und abgeführten Lufttemperatur verwendet. Da die Temperatur des abfließenden Luftstroms unmittelbar hinter dem Werkzeug nicht ohne Weiteres am Versuchsaufbau gemessen werden kann, wird der Wärmestrom durch erzwungene Konvektion für verschiedene Temperaturen der abfließenden Luft berechnet. Da sich die Luft hinter dem Werkzeug nicht höher als die Werkzeugtemperatur selbst aufheizen kann, liegt der letzte Berechnungspunkt bei einer Temperatur von 100°C.

Indem die Gleichung 3.8 nach α_e umgestellt wird, kann der Wärmeübergangskoeffizient bei erzwungener Konvektion berechnet werden. Der mittels erzwungener Konvektion übertragene Wärmestrom wird analog zur freien Konvektion über Gleichung 3.1 ermittelt. Als Lufttemperatur in der Kühleinheit ϑ_∞ wurde die mittlere Temperatur ϑ_m bei erzwungener Konvektion angenommen. Die Temperatur des Werkzeuges ϑ_w beträgt, wie bei der Berechnung der freien Konvektion 100°C. Der daraus resultierende Wärmestrom durch die Kühlung ist in Bild 18 rechts dargestellt.

Der Wärmestrom, welcher durch erzwungene Konvektion hervorgerufen werden kann, liegt je nach Lufttemperatur hinter dem Werkzeug zwischen ca. 315 – 640 W. Im Vergleich zum Wärmestrom, welcher innerhalb der Kühleinheit durch freie Konvektion erzeugt wird, ist dieser Wert deutlich höher. Somit kann bestätigt werden, dass der größte Teil der Kühlwirkung der Kühleinheit mittels erzwungener Konvektion erzeugt wird.

Um den Anteil des Wärmestroms, welcher in der Kühleinheit abgeführt wird, mit dem Wärmestrom, der über den Schleifprozess in das Werkzeug eingebracht wird, ins Verhältnis zu setzen, muss zunächst der gesamte Wärmestrom, der durch den Schleifprozess entsteht, berechnet werden. Dafür wird eine grundlegende Annahme zu Vereinfachung getroffen. Der Wärmeeintrag in das Werkzeug durch das Umlaufen und die Reibung an den Führungsrollen werden vernachlässigt.

Die Schleifleistung wird über den Zusammenhang

$$\boldsymbol{P_c = F_t \cdot v_c} \tag{3.11}$$

berechnet. Mit einer angenommenen Schleiftangentialkraft F_t von 200 N und einer Schnittgeschwindigkeit v_c von 20 m/s ergibt sich eine Schleifleitung P_c von 4000 W. Dies ist gleichbedeutend mit dem Gesamtwärmestrom, der sich wie folgt aufteilt:

- durch die Späne $\dot{\boldsymbol{Q}}_{sp}$
- in das Werkzeug $\dot{\boldsymbol{Q}}_{wz}$
- in das Werkstück $\dot{\boldsymbol{Q}}_{wst}$

Über die spezifische Energie, die aus der Literatur angenommen werden kann, wird der Wärmestrom berechnet, den die Späne aufnehmen. Ein typischer Wert für e_{sp} liegt bei 5,85 J/mm³. Der Wärmestrom, der über die Späne abgeführt wird, ergibt sich aus dem Produkt aus Zeitspanvolumen Q_w und spezifischer Spanenergie e_{sp}.

$$\dot{\boldsymbol{Q}}_{\boldsymbol{sp}} = \boldsymbol{e_{sp} \cdot Q_W} \tag{3.12}$$

mit

$$\boldsymbol{Q_W = d_s \cdot l_c \cdot v_f} \tag{3.13}$$

Der Werkzeugdurchmesser d_s entspricht 10,3 mm, die Eingriffsbreite l_c beträgt 250 mm und als effektive Vorschubgeschwindigkeit v_f wird 5 mm/min angenommen. Es ergibt sich ein Wärmestrom über die Späne von 1255,41 W.

Der Wärmestrom in das Werkzeug ergibt sich aus der folgenden Gleichung:

$$\dot{\boldsymbol{Q}}_{\boldsymbol{wz}} = (\boldsymbol{1 - R_{WS}})\dot{\boldsymbol{Q}}_{\boldsymbol{WS}} \tag{3.14}$$

Der Wärmestrom $\dot{Q}_{WS}$ ergibt sich aus der Differenz des gesamten Wärmestroms und des Wärmestroms über die Späne. Der Faktor R_{WS} wurde von Rowe et al. [ROW91] hergeleitet und berechnet sich über:

$$\boldsymbol{R_{WS}} = \left[\mathbf{1} + \frac{\boldsymbol{k_g}}{\boldsymbol{\beta_w} \cdot \sqrt{\boldsymbol{r_0 v_c}}}\right]^{-\mathbf{1}} \tag{3.15}$$

Mit

$$\boldsymbol{\beta_w} = \sqrt{\boldsymbol{k_w \rho_w c_w}} \tag{3.16}$$

Die Wärmeleitfähigkeit der Diamantschleifkörner k_g k_g beträgt 2000 W/m K. Für den Faktor r_0, welcher ein Maß für die Schärfe der Körner ist, werden nach Marinescu et al. 20 µm angenommen [MAR13]. Setzt man diese Werte in die entsprechenden Gleichungen ein, so erhält man für den Wärmestrom $\dot{Q}_{WZ}$ in das Werkzeug einen Wert von 2404,26 W. Bei einem Abwärmestrom durch die Wirbelrohrkühlung von maximal 640 W, kann etwa 25 % der durch den Schleifprozess im Werkzeug entstehende Wärme durch die Kühlung abgeführt werden.

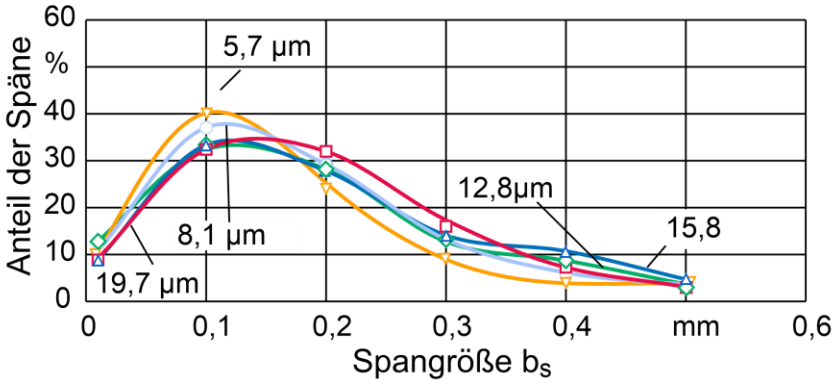
Abschließend lässt sich sagen, dass die Kühlwirkung durch Konvektion zum einen mit steigendem Druck zunimmt, da mit höherem Druck die Luftgeschwindigkeit am Kaltluftende des Wirbelrohres sowie die Unterkühlung der Luft steigt. Zum anderen erhöht sich der mittels Konvektion übertragene Wärmestrom bei steigender Temperaturdifferenz und dementsprechend steigender Werkzeugtemperatur.

3.1.5 Bewertung der Leistungsfähigkeit (AP 5)

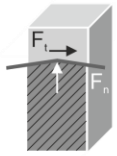
Im letzten Arbeitspaket war es das Ziel, die Leistungsfähigkeit des neu ausgelegten Prozess- und Werkzeugkonzepts zu evaluieren und somit die Relevanz der gewonnenen Erkenntnisse zu validieren.

Da es sich in diesem Fall um ein trockenes Verfahren handelt, ist die Span- und Staubexposition entscheidend für das umstehende Personal. Insbesondere, da das Seilschleifen in der industriellen Praxis in der Regel ohne Umhausung stattfindet. Die Auswertung wurde wie geplant in zwei Schritten durchgeführt. Zunächst wurden die Späne mittels Siebanalyse charakterisiert. Weiterhin wurde mittels Partikelmesssensor die Feinstaubbelastung vor, während und nach den Versuchen aufgenommen.

Exemplarisch ist in Bild 19 die Partikelgrößenverteilung der anfallenden Späne für stark abweichende Einzelkornspanungsdicken dargestellt, da diese maßgeblich für die Größe der anfallenden Schleifspäne ist. Es ist zu erkennen, dass die mittlere Spangröße mit der Einzelkornspanungsdicke korreliert. Für eine Einzelkornspanungsdicke von 5,7 µm liegt diese bei 103 µm. Die mittlere Spangröße steigt dann an bis zu einer Größe von 158 µm bei einer Einzelkornspanungsdicke von 19,7 µm. Im Laufe der Versuche konnte zwar ein Einfluss des Verschleißes auf die mittlere Spangröße festgestellt werden. Dieser lag allerdings im Bereich weniger µm und wird deshalb nicht näher erläutert. Interessant für die Gesundheit sind besonders die kleinen Späne und Partikel. Über das Sieben konnte festgestellt werden, dass 9 – 12 % der Späne 10 µm oder kleiner sind. Da hier die Gefahr lungengängiger Teilchen besteht, wurde mittels Partikelmesssensor die Feinstaubbelastung analysiert.

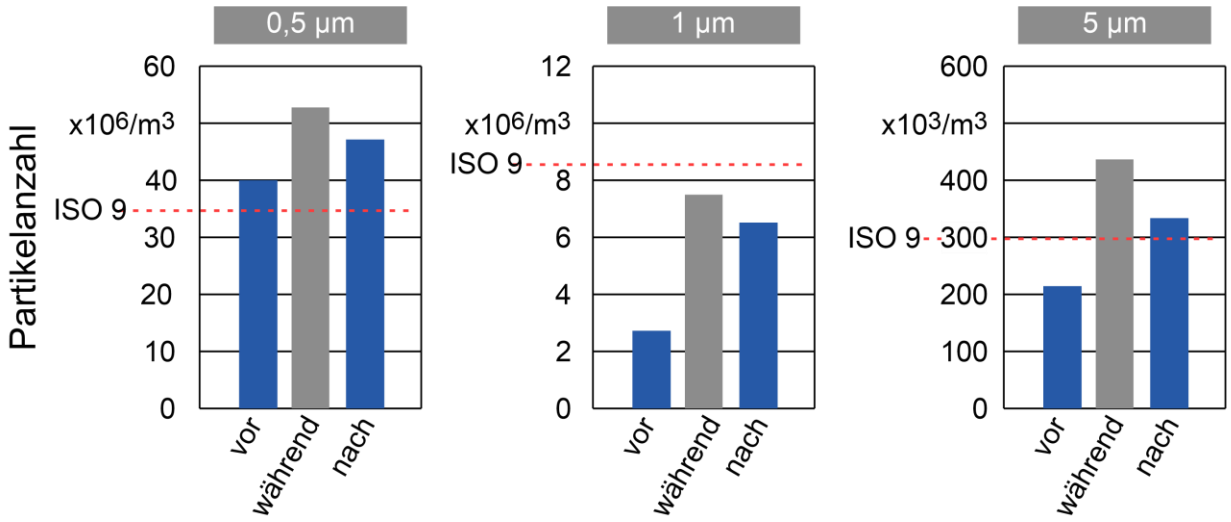


Prozessstellgrößen:		Werkzeug:		Werkstück:
v_c	= var.	Husqvarna		Baustahl S355 JR
v_f	= var.	d_g	= var.	
p_v	= 2,5 bar	n_s	= 44 1/m	
		λ	= var.	

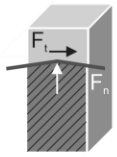


Hel/122566 © IFW

Bild 19: Spangrößenverteilung



Prozessstellgrößen:		Werkzeug:		Werkstück:
v_c	= var.	Husqvarna		Baustahl S355 JR
v_f	= var.	d_g	= 651	
p_v	= 2,5 bar	n_s	= 44 1/m	
		λ	= 0,22	



Hel/122567 © IFW

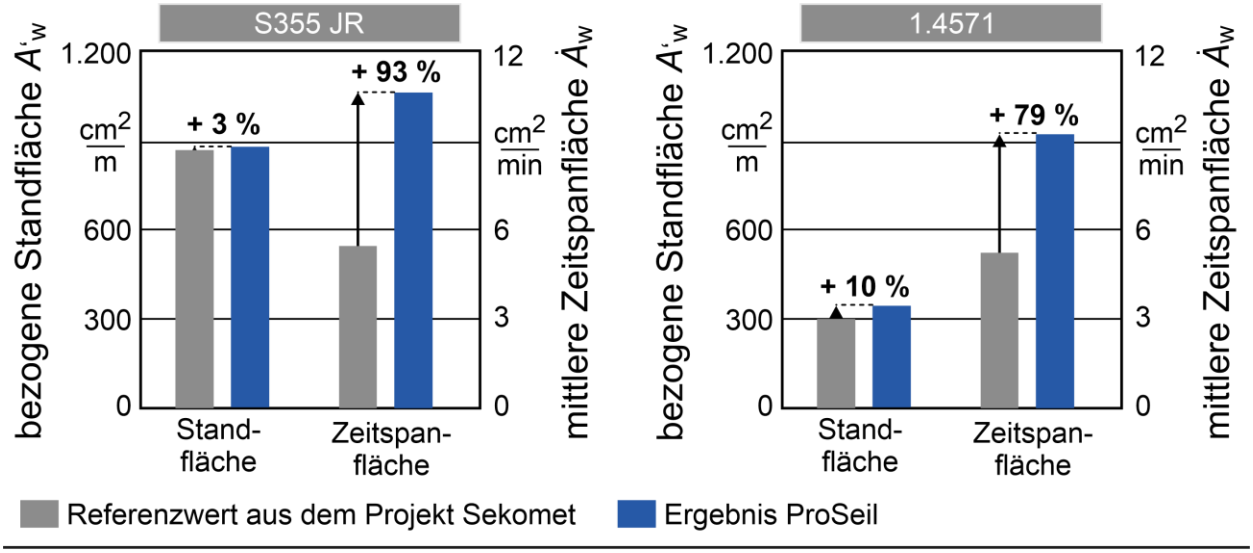
Bild 20: Feinstaubbelastung beim Seilschleifen

Es wurden dazu vor den Versuchen Messungen als Referenz durchgeführt. Zusätzlich wurden Messungen außerhalb der Maschine während der Versuchsdurchführung durchgeführt. Abschließend wurde 15 min nach Versuchsende erneut gemessen. Die Ergebnisse sind für die Partikelgrößen 0,5 µm, 1 µm und 5 µm in Bild 20 dargestellt. Es wurde jeweils ein Volumen von 15 l gemessen und die Partikelanzahl dokumentiert. Die Feinstaubmessung ist sehr sensibel und unterliegt Schwankungen aufgrund der handgeführten Messung und Luftverwirbelungen im Raum. Es wurden deshalb je Versuchspunkt 3 Wiederholmessungen durchgeführt. Die Auswahl der Partikelgrößen wurde anhand der

DIN EN ISO 14644-1 getroffen. Diese gibt Grenzwerte für unterschiedliche Raumklassen vor. Die „ISO 9“ gilt hier als normale Raumluft. Sie wurde deshalb als Vergleichswert im Diagramm eingefügt. Am Beispiel in Bild 20 ist zu erkennen, dass alle Partikelklassen während des Versuchs stark ansteigen und auch 15 min nach dem Versuch noch erhöht sind. Der Grenzwert für Partikel mit der Größe 1 µm wird hier bereits vor dem Versuch überschritten. Insgesamt ist die Klasse „ISO 9“ jedoch als Raumklasse für präzise Fertigungen definiert, weshalb die hier gegebenen Grenzwerte noch weit von einer gesundheitsgefährdenden Konzentration entfernt sind. Trotzdem zeigen die Ergebnisse, dass die Luftqualität bei der Durchführung von trockenen Seilschleifuntersuchungen stets mitbetrachtet werden sollte, vor allem wenn keine Absaugung vorhanden ist, bzw. die Seilschleifmaschine in einer Halle betrieben wird.

Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit wurde anhand der gewonnen Erkenntnisse die Kühlung, die Seillänge und das Werkzeug für das Trennen von Edelstahl 1.4571 ausgelegt. Es hat sich gezeigt, dass die Konfiguration mit 2 Wirbelrohren, einer Seillänge von 11,4 m die höchste Standfläche und Zeitspanfläche ermöglicht hat. Zudem wurde hier das Werkzeug K650L2,5 eingesetzt, dass bereits zuvor die höchste Standfläche erzielt hat. Es wurden zunächst die Vorschub- und Schnittgeschwindigkeit analog zu AP 3 variiert, um ein geeignetes Prozessfenster zu ermitteln. Der Versuchsumfang wurde wie bisher auf dem stationären Versuchsstand durchgeführt, wodurch hier ein Mehraufwand entstand. Dies war jedoch notwendig, da der Edelstahl deutlich schwerer zerspanbar ist und für das vorliegende Werkzeug hier bisher keine Kenntnisse über geeignete Stellgrößen und die Leistungsfähigkeit vorlagen. Im Gegensatz zum Baustahl S355 JR hat sich gezeigt, dass eine Vorschubgeschwindigkeit von 7 mm/min nicht realisierbar ist. Es kam hier sofort zum sehr starken Kraftanstieg und Seilriss. Deshalb wird auch hier eine Vorschubgeschwindigkeit von 5 mm/min als Leistungsgrenze angenommen. Dadurch wurde eine Standfläche von 3.762 cm² bzw. eine bezogene Standfläche von 330 cm²/m erreicht.

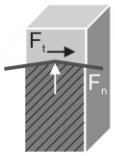
Zur Einordnung der Ergebnisse wurden die erreichte Produktivität und Standfläche für die Werkstoffe S355 JR und 1.4571 den Ergebnissen vorangegangener Projekte gegenübergestellt. Dies ist in Bild 21 abgebildet.



Prozessstellgrößen:
v_c = var.
v_f = var.
p_V = 2,5 bar

Werkzeug:
Husqvarna
d_g = var.
n_s = 44 1/m
λ = var.

Werkstück:
Baustahl S355 JR
Edelstahl 1.4571



Hel/122568 © IFW

Bild 21: Leistungsfähigkeit des ausgelegten Seilschleifprozesses

Bei der Bearbeitung des Baustahls konnte durch den neu ausgelegten Schleifprozess eine sehr deutliche Steigerung der Produktivität (+ 93 %) bei vergleichbarer Werkzeugstandfläche erreicht werden. Dies ist auf verbesserte Kühlwirkung und effizientere Werkzeugspezifikation zurückzuführen. Ein ähnliches Ergebnis wurde mit dem Edelstahl 1.4571 erzielt. Aufgrund des Werkstoffverhaltens ist hier insgesamt eine deutlich geringe Standfläche erreichbar. Dennoch konnte diese um 10 %gesteigert werden, während die Produktivität deutlich um 79 % zunahm. Somit zeigt sich, dass durch die gezielte Verringerung der thermischen Belastung durch im Projektverlauf durchgeführte Werkzeug- und Prozessauslegung eine signifikante Steigerung der Leistungsfähigkeit bei der trockenen Bearbeitung von Stahlwerkstoffen ermöglicht wird.

3.1.6 Fazit

Ziel dieses Vorhabens war die Verfügbarkeit einer Methode zur systematischen Auslegung des trockenen Seilschleifens metallischer Werkstoffe unter Berücksichtigung temperaturrelevanter Faktoren, die zu einer hinreichend geringen Werkzeugtemperatur und damit zu einer Steigerung der Standzeit der Seilschleifwerkzeuge führt.

Dafür wurde zunächst der Versuchsstand erweitert, sodass die Zuführung der Druckluftkühlung kontrolliert eingestellt und überwacht werden kann. Durch Messungen der Austrittsgeschwindigkeit und –temperatur konnte so die Druckluftkühlung optimiert werden. Im Rahmen der Untersuchungen wurde durch analytische Betrachtung der thermodynamischen Zusammenhänge des Seilschleifprozesses festgestellt, dass durch eine geeignete Kühlkonfiguration eine Kühlleistung erreicht werden kann, die bei hohen Werkzeugtemperaturen bis zu 25 % des prozessinduzierten Wärmestroms in das Werkzeug ausmacht.

Anschließend wurde der Einfluss der werkzeugseitigen Kenngrößen Korngröße und Segmentlänge durch die Fertigung prototypischer Seilschleifwerkzeuge untersucht. Diese beeinflussen die Einzelkornspanungsdicke des Prozesses bei konstanten Prozessstellgrößen. Hier konnte ein direkter Zusammenhang zwischen der Einzelkornspanungsdicke und der thermomechanischen Belastung identifiziert werden. Besonders die Verringerung der Segmentlänge führt hier zu einer Steigerung der Effizienz des Schleifprozesses, da hier Reibungsverluste durch Unterschreiten der Mindestspanungsdicke verringert werden. Dieses Werkzeug bietet somit auch bei höherer Produktivität Leistungsreserven gegenüber aktuell industriell eingesetzten Seilen.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde anschließend der Einfluss der Systemgrößen Seillänge Kühlkonfiguration auf das Einsatz- und Verschleißverhalten in einem breiten Prozessstellgrößenfenster untersucht. Hier zeigt sich, dass eine Schnittgeschwindigkeit von 20 m/s und eine Vorschubgeschwindigkeit von 5 mm/min das optimale Verhältnis aus thermomechanischer Belastung und erreichbarer Produktivität bietet. So konnte bereits eine Steigerung der Werkzeugstandfläche von 16 % bei einer konstanten Zeitspanfläche von ca. 650 cm²/min erreicht werden. Durch den Einsatz des Prototypen-Werkzeugs mit kleinster Segmentlänge wurde sogar eine Verdopplung der Standfläche gegenüber der industriellen Referenz erreicht.

Im letzten Schritt wurden die gewonnen Erkenntnisse zusammengefasst und auf das Trennen von schwer zerspanbarem Edelstahl 1.4571 übertragen, da dieser Werkstoff ebenfalls eine hohe industrielle Relevanz besitzt und die ein deutlich höheren Werkzeugverschleiß bedingt. Die Ergebnisse wurden anschließend in den Stand der Technik eingeordnet. So konnte beim Trennen des Edelstahls bei einer Steigerung der Standfläche von 10 % die Produktivität um 79 % gegenüber vergleichbaren Prozesses vorheriger Forschungsprojekte erreicht werden. Beim Baustahl wurde eine Steigerung der Produktivität von 93 % bei vergleichbarer Standfläche (+3 %) erreicht.

3.2 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

3.2.1 Wissenschaftlicher Nutzen

Der wissenschaftliche Nutzen dieses Vorhabens besteht vor allem im besseren Verständnis des Seilschleifprozesses und in der Kenntnis geeigneter Werkzeugspezifikationen für die trockene Bearbeitung von Stahl. Zudem konnten Potentiale für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsvorhaben identifiziert werden.

Der Stand der Wissenschaft wurde dahingehend erweitert, dass die Wirkzusammenhänge zwischen den temperaturrelevanten Einflussfaktoren und dem Einsatz- und Verschleißgrößen bekannt ist. Dies beinhaltet ein tiefergehendes Verständnis der thermodynamischen Bedingungen beim Seilschleifen und die modellhafte Betrachtung und Auslegung der Druckluftkühlung.

Weiterhin wurden prototypische Seilschleifwerkzeuge hergestellt. Hier konnte das Wissen über den Einfluss der Korngröße auf das Einsatzverhalten ermittelt werden. Darüber hinaus konnte ein direkter Zusammenhang zwischen der durch die Segmentlänge bestimmten Einzelkornspanungsdicke und der Effizienz des Schleifprozesses ermittelt werden. Dieses Wissen kann zum einen für zukünftige Untersuchungen von Seilschleifwerkzeugen verwendet werden. Zum anderen ist dieser Zusammenhang auch gegebenenfalls übertragbar auf andere Schleifprozesse, in denen segmentierte Schleifwerkzeuge eingesetzt werden. Im Bereich des Rückbaus und Trennschleifen ist dies beispielsweise bei großen Diamanttrennscheiben der Fall.

Die abschließende Validierung der Prozess- und Werkzeugauslegung hat gezeigt, dass dieses Forschungsvorhaben einen grundlegenden Beitrag zur Wissenschaft der Seilschleiftechnologie und ihrer industriellen Anwendbarkeit geleistet hat.

3.2.2 Kommerzieller Nutzen

Hinsichtlich des kommerziellen Nutzens profitieren zwei Interessengruppen von den in diesem Vorhaben erzielten Erkenntnissen: die Anwender der Seilschleiftechnologie im Rückbau kerntechnischer Anlagen und die Hersteller von Seilschleifwerkzeugen.

Für die erstgenannte Interessengruppe ergibt sich ein kommerzieller Nutzen aus der gesteigerten Prozesssicherheit und Effizienz beim trockenen Einsatz der Seilschleiftechnologie an metallischen Strukturen. Aufgrund der Vielzahl der im Rückbau zu trennenden großvolumigen Bauteile ist die Bearbeitungsdauer hier ein wichtiger Kostenfaktor und beeinflusst damit die Wirtschaftlichkeit des Prozesses und die Gesamtkosten der Rückbauprojekte. Die gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich Prozessauslegung und Werkzeugkonzept können direkt in der industriellen Praxis angewendet werden, da der Großteil der Ergebnisse direkt mit bestehenden Anlagen von Anwendern umgesetzt werden können. Mit der gesteigerten Produktivität geht eine Verkürzung der Aufenthaltsdauer des Bedienpersonals im potentiell kontaminierten Arbeitsumfeld und damit eine Reduzierung der Personendosis einher.

Für die zweite Interessengruppe der Werkzeughersteller besteht der kommerzielle Nutzen voranging in der Möglichkeit, neue Werkzeugkonzepte anbieten zu können, die besonders auf die hohe thermische Belastung beim trockenen Seilschleifen abgestimmt sind. Besonders die Erkenntnisse hinsichtlich der Segmentlänge sind zudem in bestehenden Herstellroutinen der Hersteller ohne größere Investitionskosten umsetzbar, sodass die Hersteller unmittelbar von den Projektergebnissen profitieren können. Sie können dadurch einen Wettbewerbsvorteil erzielen bzw. sichern und damit zum wirtschaftlichen Unternehmenserfolg beizutragen. Zudem bilden die gewonnenen Erkenntnisse die Grundlage für weitere Werkzeugoptimierungen.

3.3 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

- Entfällt -

3.4 Veröffentlichungen und Vorträge

3.4.1 Erfolgt

Vorträge

- **Denkena, B., Krödel, A., Heller, C.; 2021:** Model based dry wire grinding of steel, KONTEC 2021, Dresden

Veröffentlichungen

- **Denkena, B.; Krödel, A., Heller, C.; 2021:** Model based dry wire grinding of steel, Tagungsband KONTEC 2021, Dresden
- **Denkena, B.; Bergmann, B., Heller, C.; 2023:** Increase of the tool life of wire grinding tools through analysis of the thermomechanical process load, Tagungsband KONTEC 2023, Dresden
- **Denkena, B., Bergmann, B., Heller, C.; 2024:** Influence of the tool specification on the performance of steel wire grinding, Springer Nature Applied Science, eingereicht.

3.4.2 Geplant

Veröffentlichungen

- **Heller, C.**: Wirkmechanismen beim Seilschleifen von Stahl, Dissertation, Leibniz Universität Hannover, geplant

Kurzbericht zum Forschungsvorhaben

Produktives Seilschleifen von Stahl durch modellbasierte Prozessauslegung (ProSeil)

Förderer:	Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
Förderkonzept:	Forschung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen (FORKA)
Projektträger:	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS)
Förderkennzeichen:	15S9424
Laufzeit:	01.10.2020 – 31.12.2023
Zuwendungsempf.:	Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
Ausführende Stelle:	Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW)
Projektleiter:	Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena
Projektbearbeiter:	M. Sc. Christian Heller

Das Seilschleifen wird aufgrund seiner Flexibilität vermehrt beim Rückbau kerntechnischer Anlagen zum Trennen von Stahlbauteilen eingesetzt. Das wirtschaftliche Potential dieser Fertigungstechnik wurde bereits in verschiedenen Rückbauprojekten aufgezeigt. Insbesondere die vielfältigen Bauteilgeometrien und die Werkstoffvielfalt im Rückbau stellen dabei eine große Herausforderung dar. Besonders das Trennen von Stahlbauteilen ist aufgrund derzeit noch unzureichender Prozesskenntnis mit einem erheblichen Verlust der Werkzeugstandzeit verbunden. Zudem kommt es hier häufig zum vorzeitigen Komplettversagen des Werkzeugs. Im Rückbau kerntechnischer Anlagen wird zusätzlich auf die konventionelle Wasserkühlung verzichtet, um Querkontaminationen zu vermeiden. Dies erhöht die thermomechanische Belastung des Werkzeugs soweit, dass es zur thermischen Überlastung der Werkzeugummantelung kommt. Dies führt dazu, dass sich die Schleifsegmente auf dem Trägerseil vorzeitig lösen können, was im Verhaken des Werkzeugs am Werkstückeintritt und schließlich im Komplettversagen des Werkzeugs resultiert. Bisherige Untersuchungen haben bereits gezeigt, dass beim Trennen von Stahl die thermische Belastung der Werkzeugummantelung das ausschlaggebende Standzeitkriterium von Seilschleifwerkzeugen darstellt. Aktuell sind die thermodynamischen Zusammenhänge im Seilschleifprozess nicht hinreichend bekannt. Deshalb ist eine gezielte Prozess- und Werkzeugauslegung zur Vermeidung dieser thermischen Überlastung des Werkzeugs nicht möglich. Ziel dieses Vorhabens ist deshalb die Verfügbarkeit einer Methode zur systematischen Auslegung des trockenen Seilschleifens metallischer Werkstoffe unter Berücksichtigung temperaturrelevanter Faktoren, die zu einer hinreichend geringen Werkzeugtemperatur und damit zu einer Steigerung der Standzeit der Seilschleifwerkzeuge führt.

Dafür wurde zunächst der Versuchsstand erweitert, sodass die Zuführung der Druckluftkühlung kontrolliert eingestellt und überwacht werden kann. Durch Messungen der

Austrittsgeschwindigkeit und –temperatur konnte so die Druckluftkühlung optimiert werden. Im Rahmen der Untersuchungen wurde durch analytische Betrachtung der thermodynamischen Zusammenhänge des Seilschleifprozesses festgestellt, dass durch eine geeignete Kühlkonfiguration eine Kühlleistung erreicht werden kann, die bei hohen Werkzeugtemperaturen bis zu 25 % des prozessinduzierten Wärmestroms in das Werkzeug ausmacht.

Anschließend wurde der Einfluss der werkzeugseitigen Kenngrößen Korngröße und Segmentlänge durch die Fertigung prototypischer Seilschleifwerkzeuge untersucht. Diese beeinflussen die Einzelkornspanungsdicke des Prozesses bei konstanten Prozessstellgrößen. Hier konnte ein direkter Zusammenhang zwischen der Einzelkornspanungsdicke und der thermomechanischen Belastung identifiziert werden. Besonders die Verringerung der Segmentlänge führt hier zu einer Steigerung der Effizienz des Schleifprozesses, da hier Reibungsverluste durch Unterschreiten der Mindestspanungsdicke verringert werden. Dieses Werkzeug bietet somit auch bei höherer Produktivität Leistungsreserven gegenüber aktuell industriell eingesetzten Seilen.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde anschließend der Einfluss der Systemgrößen Seillänge Kühlkonfiguration auf das Einsatz- und Verschleißverhalten in einem breiten Prozessstellgrößenfenster untersucht. Hier zeigt sich, dass eine Schnittgeschwindigkeit von 20 m/s und eine Vorschubgeschwindigkeit von 5 mm/min das optimale Verhältnis aus thermomechanischer Belastung und erreichbarer Produktivität bietet. So konnte bereits eine Steigerung der Werkzeugstandfläche von 16 % bei einer konstanten Zeitspanfläche von ca. 650 cm²/min erreicht werden. Durch den Einsatz des Prototypen-Werkzeugs mit kleinster Segmentlänge wurde sogar eine Verdopplung der Standfläche gegenüber der industriellen Referenz erreicht.

Im letzten Schritt wurden die gewonnen Erkenntnisse zusammengefasst und auf das Trennen von schwer zerspanbarem Edelstahl 1.4571 übertragen, da dieser Werkstoff ebenfalls eine hohe industrielle Relevanz besitzt und die ein deutlich höheren Werkzeugverschleiß bedingt. Die Ergebnisse wurden anschließend in den Stand der Technik eingeordnet. So konnte beim Trennen des Edelstahls bei einer Steigerung der Standfläche von 10 % die Produktivität um 79 % gegenüber vergleichbaren Prozesses vorheriger Forschungsprojekte erreicht werden. Beim Baustahl wurde eine Steigerung der Produktivität von 93 % bei vergleichbarer Standfläche (+3 %) erreicht.

Mit Abschluss des Projekts ist bekannt, wie die System- und Prozessstellgrößen sowie das Seilschleifwerkzeug ausgelegt werden muss, um die standzeitlimitierende thermische Überlastung der Werkzeuggummierung zu verringern und die Effizienz die Produktivität des Seilschleifprozesses signifikant zu steigern. Dies erhöht die Wirtschaftlichkeit des Prozesses im kerntechnischen Rückbau, wodurch Anwender und Hersteller von Seilschleifwerkzeugen gleichermaßen profitieren.

Erklärung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 15S9424 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin / beim Autor.