

Experimentelle Analyse zu ressourcen-effizienten Kühlschmierstrategien beim Bohren

(Experimental analysis of resource-efficient cooling lubricant strategies for drilling)

Neugebauer, R.¹; Schmidt, G.¹; Dix, M.¹

¹ Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU)

Abstract

Die steigenden Preise für Rohstoffe und Energie führen zu erhöhten Forderungen an die Effizienz von Fertigungsprozessen. Standen bisher vorrangig die Analyse und Optimierung der technischen Performance und der Kosten im Fokus der Untersuchungen, so kommt heute die Energieeffizienz als weiterer Punkt hinzu. Bei der spanenden Bearbeitung zeichnet sich dabei ein Trend hin zur Trockenbearbeitung und Minimalmengenschmierung ab. Für das Verfahren Bohren stellt die erschwerte Wärme- und Spanabfuhr aus der Prozesszone ein Hemmnis für die Vermeidung bzw. Minimierung des Kühlschmiermitteleinsatzes dar. Im Rahmen dieses Beitrages wird der Energie- und Ressourceneinsatz bei der Bohrbearbeitung untersucht. Dabei werden verschiedene Kühlschmierstrategien bei verschiedenen Zeitspanvolumen hinsichtlich ihrer Effizienz beim Bohren ins Volle analysiert. Ziel ist ein minimaler Energie- und Ressourcenverbrauch pro Spanvolumen bei abgesicherter Spanabfuhr. Die Ergebnisse hinsichtlich Prozess- und Direktenergie pro Bohrung sowie der Bohrerstandzeiten zeigen, wie vielschichtig die Frage der Effizienz ist und dass durch die Vermeidung bzw. Verringerung des Einsatzes von Kühlschmiermitteln das Ziel Effizienzsteigerung nur teilweise oder beschränkt erreicht werden kann.

Rising prices of raw materials and energy call for an increased energy and resource efficiency of manufacturing processes. Therefore, the objective of energy efficiency is added to the existing improvement strategies focusing on the increase of technical performance and the reduction of cost so far. In particular, in machining, a

trend towards a minimum use of lubricants or even dry machining can be observed. However, for the drilling process the difficult chip and heat removal from the process zone is commonly a limitation for minimizing the use of cooling lubricants. In the article, the energy and resource efficiency of drilling operations according to several cooling and lubrication strategies as well as differing material removal rates are analyzed. The goal is a minimum use of energy and resources like tools and lubricant per chip volume on the condition of an ensured chip removal. The results regarding the process energy and machine energy consumption per drill in combination with the tool life illustrate the complexity of the several efficiency aspects. Furthermore, it is shown that the sole strategy of reducing or avoiding cooling does not necessarily result in an increased efficiency.

Keywords:

Bohren, Kühlschmierstrategie, Ressourceneffizienz
drilling, cooling, resource efficiency

1 Einleitung

Der weltweite Verbrauch an Primärenergie stieg in den letzten Jahrzehnten drastisch an. Es existiert eine Vielzahl von Szenarien [1, 2, 3], wohin diese Entwicklung führen wird. Sicher ist, dass die Preise für Energie und Rohstoffe mit steigender Nachfrage und sinkenden Vorkommen stark ansteigen werden und die Verfügbarkeit und effektive Nutzung von Energie für die Volkswirtschaften elementar sein wird.

Eine Analyse des Energieverbrauches 2007 zeigte, dass zirka 28 % [4] des Primärenergieverbrauches in Deutschland auf den industriellen Anwendungsbereich entfallen. Womit deutlich wird, dass der Industrie und damit der Produktion allgemein eine hohe Verantwortung bezüglich der Energie- und Ressourceneffizienz obliegt.

Bezogen auf die spanende Bearbeitung bedeutet dies, dass der spezifische Energieaufwand, bezogen auf das abzuspannende Werkstückvolumen, minimiert werden muss und dabei die Prozessstabilität abzusichern ist. Bei der Prozessgestaltung sind dabei, neben den energetischen Größen, die Eigenschaften des resultierenden Produktes und die der Nebenprodukte zu berücksichtigen. So muss ergänzend zur gewünschten Bauteilpräzision auch die Handhabung der Nebenprodukte Span und Grat gewährleistet sein, um energieintensive Nachbearbeitungsschritte zu minimieren und bestenfalls zu vermeiden.

In den letzten Jahren zeichnet sich beim Zerspanen ein Trend hin zur Bearbeitung mit Minimalmengenschmierung (MMS) und/oder zur Trockenbearbeitung ab. So wurden bei annähernd allen spanabhebenden Verfahren Anstrengungen unter-

nommen, um die konventionelle Überflutungsschmierung und die damit verbundenen Kosten für Gebrauchsstoffe und Instandhaltung zu vermeiden. Ein weiterer Aspekt für die MMS sind die geringere Kontaminierung der Späne und eine geringere gesundheitliche Belastung der Maschinenbediener [5].

Die Umsetzung der trockenen oder annähernd trockenen Bearbeitung führt zu höheren Prozesstemperaturen und damit zu höheren Werkzeugbelastungen und Form- und Maßabweichungen basierend auf thermischen Verzug. Daraus resultieren gesteigerte Anforderungen an die mechanische, thermische und chemische Werkzeugstabilität sowie an das Temperaturmanagement der Werkzeugmaschine.

In Kombination mit der Forderung nach höchsten Zeitspanvolumen zur Reduzierung von Bearbeitungszeiten und damit Bearbeitungskosten entstehen hohe technologische Anforderungen an Prozess, Werkzeug und Maschine. Im Rahmen dieses Beitrages wird anhand des Bohrens gezeigt, welche Faktoren bezogen auf die Kühlschmierung entscheidend für die Effizienz des Prozesses sind.

Das Bohren als Verfahren birgt einige technologische Besonderheiten bzw. Schwierigkeiten bezüglich der Kühlung und Schmierung der Prozesszone. So ist der Ort der Spanbildung für den Kühlschmierstoff im Vergleich zu Verfahren wie Fräsen und Längsdrehen nur schwer zu erreichen. Des Weiteren ist der Spanabtransport durch die engen Spanräume erschwert. Um das Problem des Spanabtransportes für die hier aufgeführten Untersuchungen zu Kühlschmierstrategien möglichst gering zu halten, wurde als Werkstückmaterial der kurzspanende Grauguss gewählt.

2 Energie- und Stoffflüsse auf Maschinenebene bei der Bohrbearbeitung

Zur energieeffizienten Gestaltung von Produktionsprozessen ist es unerlässlich, alle verfahrensrelevanten Größen und Ströme zu erfassen. Dabei ist der Betrachtungsraum von entscheidender Bedeutung, um zum einen alle Größen zu erfassen und zum anderen eine noch verarbeitbare Anzahl zu analysieren.

Dornfeld zeigte, dass alle Ebenen der Produktion, beginnend auf der höchsten Ebene der Unternehmensabläufe, über die Fabrik, die Produktionslinien, Maschinengruppen, einzelnen Maschinen, Maschinenkomponenten bis hin zum Produktionsprozess, Potentiale zur Energie- und Ressourceneinsparung aufweisen [6]. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Maschinenebene in Kombination mit der Prozessebene am Beispiel einer Bohrbearbeitung untersucht.

Bei der Analyse werden die Energieströme fokussiert, welche im Bild 1 grau schattiert sind. Dabei werden die Energieverbräuche der Kühlschmiersysteme, des jeweiligen Bearbeitungsprozesses, der maschinenspezifischen Sperrluft während der

Bearbeitungszeit und die Energieentnahme der Maschine aus dem Stromnetz gemessen und untersucht.

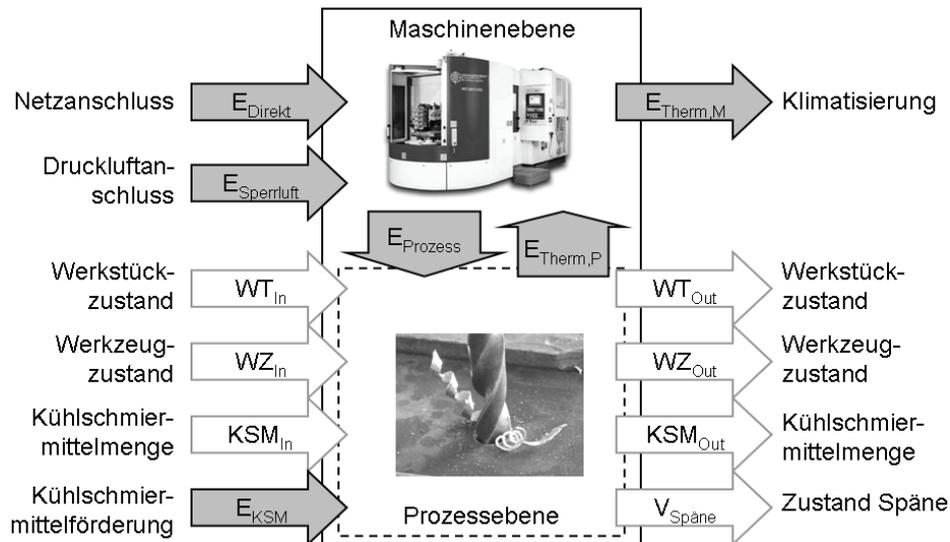


Bild 1: Energie- und Stoffflüsse im Zerspanprozess allgemein

Neben den Energieverbräuchen wurden der Werkzeugverschleiß und der Verbrauch an Kühlschmiermittel (KSM), mit in die Analyse eingeschlossen, da eine energetische Optimierung zu Lasten der Werkzeugstandzeit nicht zielführend ist.

3 Kühlschmiersystem beim Bohren

Wie eingangs beschrieben, zeichnet sich das Verfahren Bohren im Vergleich zu anderen spanenden Verfahren durch einige Besonderheiten aus. Der Ort der Spanbildung ist für Kühl- und Schmiermittel, besonders bei Bohrtiefen größer als das Anderthalbfache des Bohrerdurchmessers, schwer erreichbar [7]. Bei Bohren ohne spezielle Kühlschmiermittelkanäle muss das Schmiermittel über die Bohrernuten an die Spanzone transportiert werden. Diese Nuten werden aber ebenfalls für den Spanabtransport entgegen der Bearbeitungsrichtung genutzt, weshalb diese Art der Kühlschmierung als nicht optimal zu betrachten ist. Bei Bohren mit Kühlschmiermittelkanälen, welche bei den aufgeführten Versuchen verwendet wurden, kann das Kühl- bzw. Schmiermedium näher an die Spanstelle transportiert werden, was den Einsatz bei höheren Schnittgeschwindigkeiten ermöglicht und den Spanabtransport erleichtert.

Die Notwendigkeit einer Kühlung und Schmierung ist beim Bohren deutlich höher als bei Verfahren wie beispielsweise Fräsen und Längsdrehen. So treten beim Bohren vermehrt Reibprozesse zusätzlich zur eigentlichen Zerspanung auf. So kommt es im mittleren Bohrerbereich, dem Freischneidenbereich, auf Grund der gegen null tendierenden Schnittgeschwindigkeit, zur Materialverdrängung in Rich-

tung der äußeren Hauptschneiden anstatt zur Spanbildung. Zusätzlich treten Reibvorgänge an den äußeren Führungsleisten auf. Gepaart mit dem Fakt, dass die beim Bohrvorgang entstehende Fläche axial vor dem Bohrer nach einer halben Bohrerumdrehung (bei Bohrern mit zwei Schneiden) wieder bearbeitet wird, kommt es zu hohen Temperaturen in der Wirkzone, besonders bei hohen Bearbeitungsgeschwindigkeiten.

Diese Vielzahl von Reibflächen und die erhöhten Temperaturen fordern besonders bei hohen Bearbeitungsgeschwindigkeiten eine effektive Schmierung und Kühlung der Spanbildungszone, was aber in direktem Gegensatz zur Forderung der Anwendung von Trocken- oder Quasitrockenbearbeitung steht.

4 Versuchsaufbau

Im Versuch wurden Durchgangsbohrungen mit $\varnothing 7$ mm und einer Tiefe von 35 mm in Grauguss eingebracht und dabei die Energie- und Ressourcenverbräuche für die verschiedenen Kühlschmierstrategien, Überflutung mit Emulsion, MMS und Trockenbearbeitung mit Druckluftkühlung, bestimmt. Verwendet wird ein mehrfach beschichtetes Vollhartmetallbohrwerkzeug mit innerer Kühlschmiermittelzuführung.

In der folgenden Grafik ist der Versuchsaufbau mit Messtechnik und Messgrößen dargestellt.

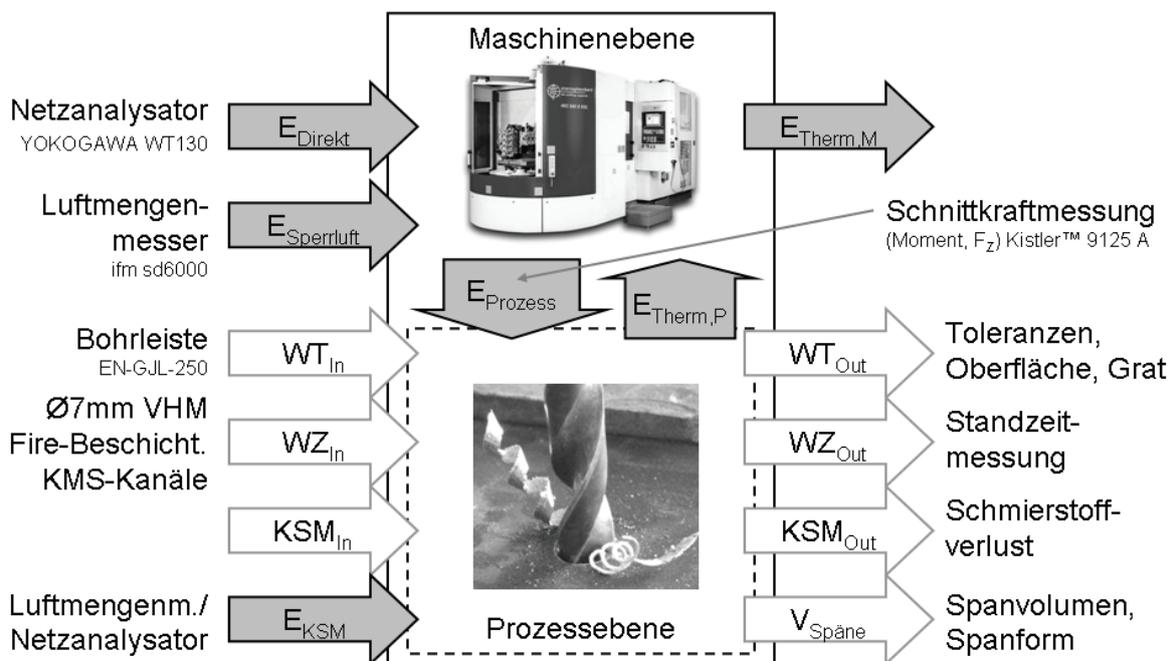


Bild 2: Versuchsaufbau der Bohrversuche mit verschiedenen Kühlschmierstrategien

Die angewandten Spanparameter sind in Tabelle 1 aufgeführt, wobei sich die Bezeichnung 100 % auf die vom Werkzeughersteller empfohlenen Parameter Vorschub pro Umdrehung f_U und Schnittgeschwindigkeit v_c bezieht.

Tabelle 1: Spanparameter

	v_c, f_U	v_c [m/min]	f_U [mm]	t_{Bohrung} [s]	Q [cm ³ /s]
Emulsion überflutet	75 %	158	0.249	1.2	1.14
	100 %	210	0.332	0.7	2.03
	125 %	263	0.415	0.4	3.18
MMS 7 bar	75 %	158	0.249	1.2	1.14
	100 %	210	0.332	0.7	2.03
	125 %	263	0.415	0.4	3.18
MMS 10 bar	75 %	158	0.249	1.2	1.14
	100 %	210	0.332	0.7	2.03
	125 %	263	0.415	0.4	3.18
Trocken	100 %	210	0.332	0.7	2.03

5 Ergebnisse

Die Größe Direktenergie E_{direkt} beschreibt die Energie, welche die Maschine in Form von elektrischer Energie aus dem Netz entnimmt. Diese und die Energie für Sperrluft $E_{\text{Sperrluft}}$ sowie die Energie $E_{\text{DL,KSM}}$ für die Druckluft bei MMS bzw. Trockenbearbeitung werden in Bild 3 aufgeführt. Die elektrische Leistung für die Kühlschmiermittelpumpen bei der Bearbeitung mit Emulsion ist in der Direktenergie enthalten (entfällt bei Trocken und MMS).

Es wird deutlich, dass die Direktenergie die größte Komponente bei den Energieeingängen darstellt. Diese ist bei MMS und Trockenbearbeitung geringer als bei der Bearbeitung mit Emulsion, da die Kühlschmiermittelpumpen für die Emulsionsschmierung mit einer Leistung von zirka 3 kW die Maschinenleistung deutlich erhöhen. Dafür werden aber bei MMS und Trockenbearbeitung zusätzliche Energien für Druckluft zum Transport des Schmiermediums bzw. zur Unterstützung des Abtransports der Späne durch die Spannuten benötigt. Die Summe ist jedoch niedriger als das Äquivalent mit Emulsion.

Es ist bei allen Kühl- bzw. Schmierstrategien ein direkter Einfluss der Bearbeitungsgeschwindigkeit erkennbar. So kommt es mit steigender Bearbeitungsgeschwindigkeit (75 % → 100 % → 125 %) zur Reduzierung des Energieverbrauchs.

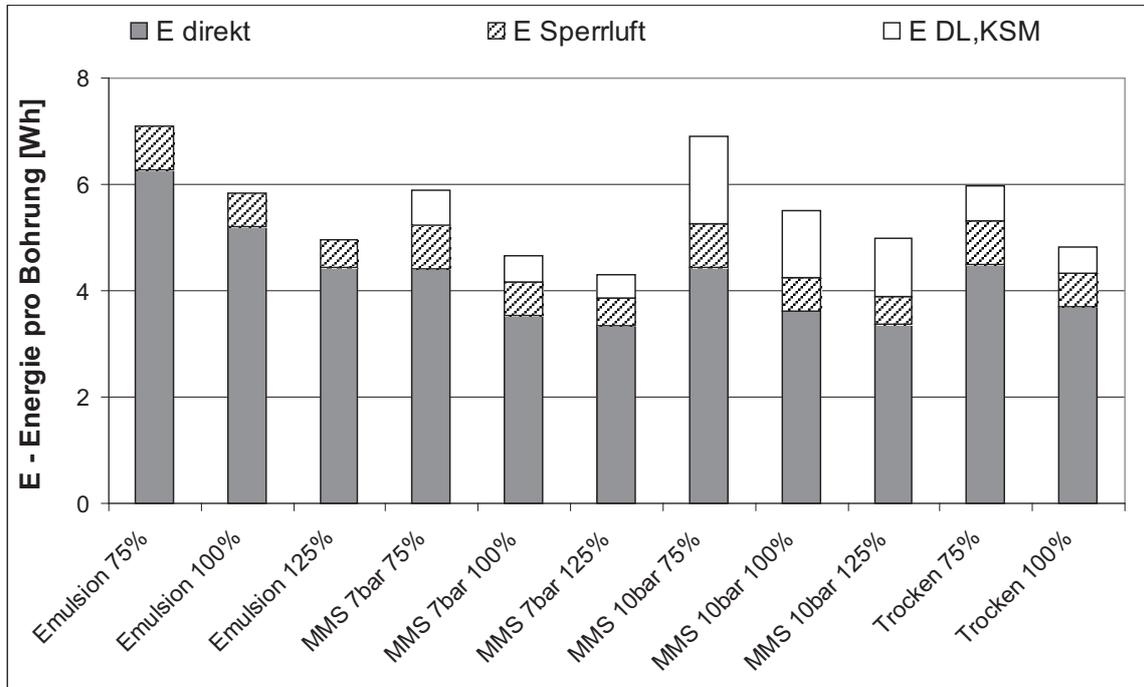


Bild 3: Energieverbrauch verschiedener KSM-Systeme und Zeitspannvolumen pro Bohrung

In Bild 4 ist ein Vergleich von Prozessenergie E_{prozess} zur Summe der Energieeinträge in die Maschine E_{In} aufgeführt, um zu klären, worauf das Absinken der Energieverbräuche bei steigender Bearbeitungsgeschwindigkeit beruht.

$$E_{\text{In}} = E_{\text{direkt}} + E_{\text{Sperluft}} + E_{\text{DL,KSM}} \quad (1)$$

Der Vergleich verdeutlicht, dass die Energieeinsparungen bei hohen Schnittparametern nicht aus dem Prozess herrühren können, da auf Prozessebene nur maximal 0,07 Wh pro Bohrung eingespart werden können, jedoch auf Maschinenebene Einsparungen von 2,13 Wh bei Emulsion bzw. von 1,93 Wh bei MMS erreicht werden. Demzufolge beruht diese Energieeinsparung auf der Reduzierung von Energie für Nebenverbraucher, welche direkt von der Prozesszeit abhängig ist. Dies wird durch die Messung der Leistungsentnahme der Maschine aus dem Netz bestätigt. Die arbeitsbereite Maschine (laufende Spindel und Werkzeug außerhalb des Eingriffs) weist eine durchschnittliche Leistung von 9,2 kW bei angeschalteten Pumpen für Emulsionskühlschmierung und 6 kW bei ausgeschalteten Pumpen (MMS und Trockenbearbeitung) auf. Demzufolge ist die Grundlast basierend auf den Nebenverbrauchern deutlich höher als die Prozesslast, weswegen die Prozesszeit bzw.

das Zeitspannvolumen von elementarer Bedeutung für eine hohe Effizienz der Bohrbearbeitung sind.

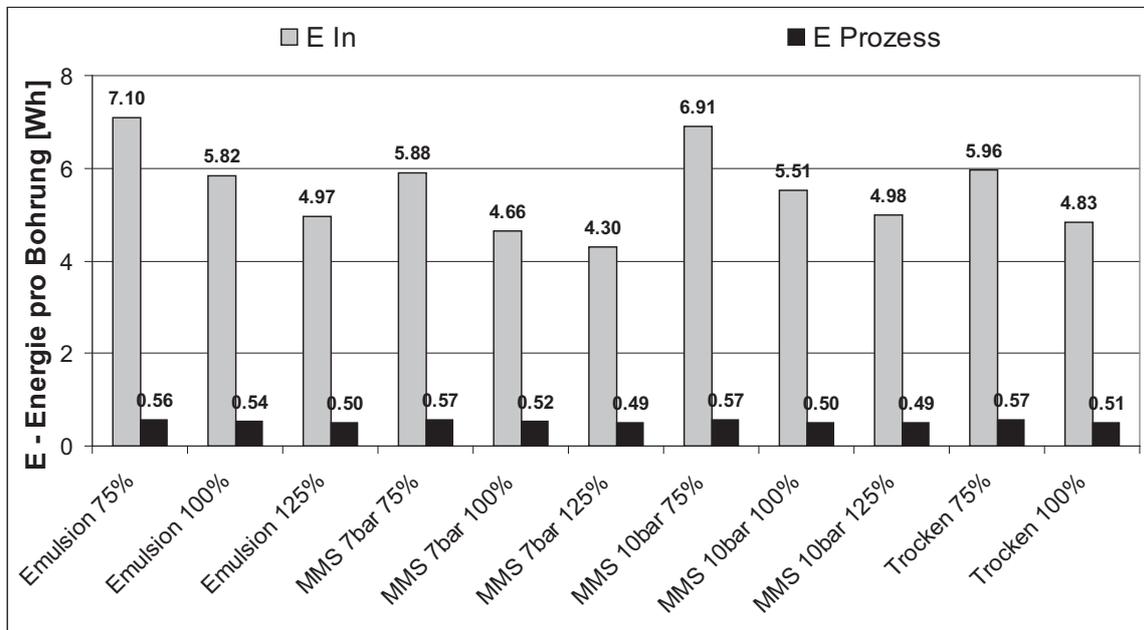


Bild 4: Summe der Energieeinträge in die Maschine E_{in} und Prozessenergie

Neben dem Energieverbrauch ist auch der Verbrauch weiterer Ressourcen von zentralem Interesse für eine gute ökologische und ökonomische Bilanz eines Produktionsprozesses. Da diese Untersuchungen einen energetischen und technologischen Vergleich der Kühlschmierstrategien darstellen, liegt ein Vergleich der Werkzeugstandzeit (Bild 5) und der Kosten für Schmiermittelverbrauch (Bild 7) bei den verschiedenen Kühlschmierstrategien und Zeitspannvolumen nahe.

Bild 5 verdeutlicht, dass zwar Potentiale zur Energieeinsparung mittels des Einsatzes von MMS oder Trockenbearbeitung anstatt Überflutungsschmierung mit Emulsion bestehen, jedoch dies immer zu Lasten der Werkzeugstandzeit geht. So zeigten sich besonders bei Trockenbearbeitung und bei MMS mit hohen Zeitspannvolumen deutlich geringere Werkzeugstandzeiten im Vergleich zur Bearbeitung mit Emulsion. Für die Untersuchungen der Standzeit wurde als Kriterium das Auftreten von starker Gratbildung, die immer im Zusammenhang mit starkem Schneideneckenverschleiß auftrat, gesetzt. Im folgenden Bild 6 sind Gratform und Werkzeugverschleiß bei MMS 7 bar mit neuem und verschlissenen Werkzeug dargestellt.

Bei einer Anzahl von 900 Bohrungen (31,5 m) und keinem Auftreten von signifikantem Verschleiß wurde die Versuchsreihe gestoppt. Dies war bei allen Versuchen mit Emulsion und bei MMS 10 bar mit geringem Zeitspannvolumen $Q = 1,14 \text{ cm}^3/\text{min}$ der Fall. Für diese Zerspan- und Schmierparameter sind demzufolge noch deutlich höhere Werkzeugstandzeiten zu erwarten als in Bild 5 aufgeführt.

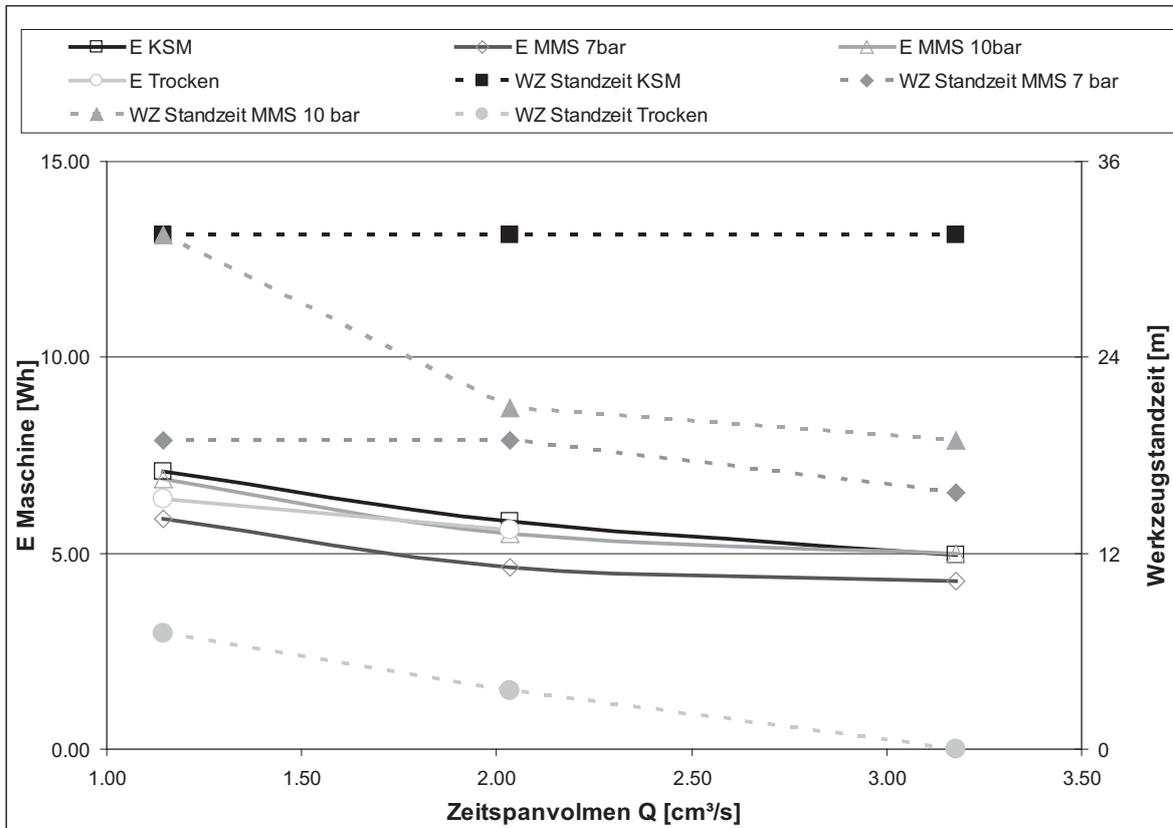


Bild 5: Bohrerstandweg und E_{in} bei verschiedenen Kühlschmierstrategien und Zeitspanvolumen

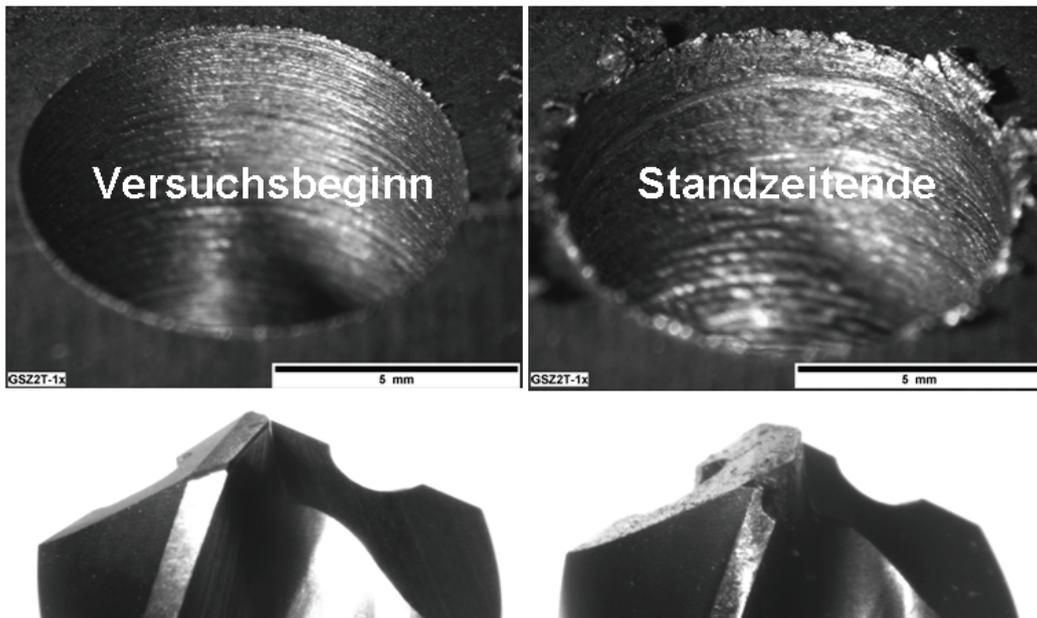


Bild 6: Gratform und lichtmikroskopische Bohrer Aufnahme bei Versuchsbeginn und Standzeitende

Zum Vergleich des Schmiermittelverbrauchs im Bild 7 wurden die Kosten K als Vergleichsgröße gewählt, da deutliche Unterschiede im Preis pro Liter für die verschiedenen Schmierstoffe von MMS und Emulsion bestehen. Beim Preis pro Liter für das jeweilige Schmiermittel wurde auf Werte eines Werkzeugherstellers zurückgegriffen [8]. Die volumenbezogene Bestimmung des Schmiermittelverbrauchs bei Emulsion beruht auf einer Studie von Weinert [9], welcher den Verbrauch einer Bearbeitungsstraße für die spanende Bearbeitung von Getriebegehäusen analysierte. Der Verbrauch von MMS war zeitbezogen, wobei vom Schmiermedium ein Volumenstrom von $V = 50 \text{ ml/h}$ abgegeben wurde.

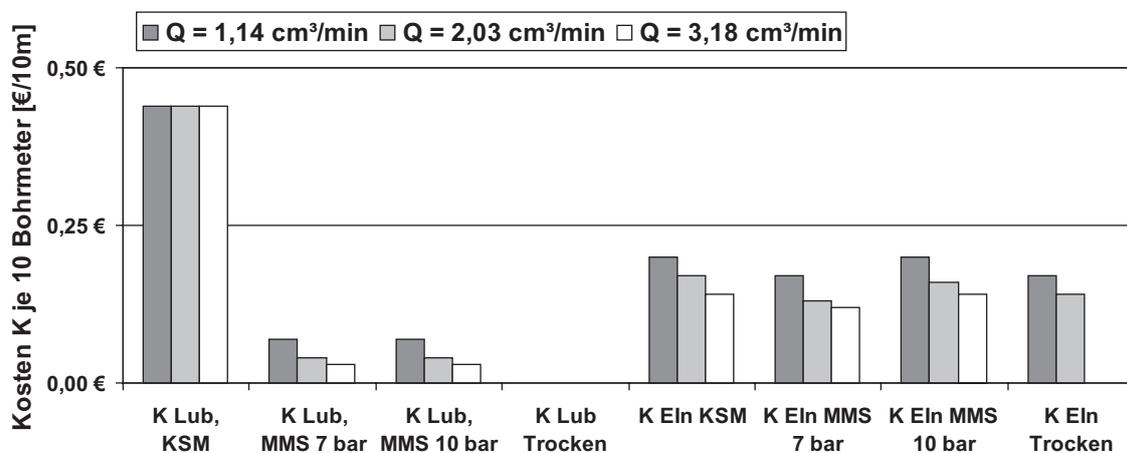


Bild 7: Vergleich der Kosten K für Kühlschmiermittelverbrauch und für Energieverbrauch von verschiedenen Kühlschmierstrategien

Die Analyse der Kosten für den Kühlschmiermittelverbrauch zeigt, dass bei der Bearbeitung mit Emulsion deutlich höhere Kosten für Kühlschmiermittel beim Einsatz von Überflutungskühlschmierung mit Emulsion entstehen als mit MMS. Dabei bezieht die Betrachtung nicht mit ein, dass bei Emulsion ein biologischer Verschleiß des Schmiermittels über die Zeit besteht und somit zusätzliche Kosten für Wechsel und Wartung auftreten.

6 Diskussion

Die Ergebnisse der Bohrversuche verdeutlichen, dass die Steigerung der Effizienz von Bearbeitungsprozessen mittels einer Anpassung der Kühlschmiermittelstrategie möglich ist, jedoch viele Faktoren mit in die Betrachtung einbezogen werden müssen. Eine Reduktion des Energieverbrauchs pro Bohrung um bis zu 20 % mittels eines Wechsels von Emulsion zu MMS ist möglich, jedoch führt dies besonders bei hohen Zeitspanvolumen zu deutlich geringeren Bohrerstandzeiten. Bei der Trockenbearbeitung konnte im Vergleich zu MMS keine signifikante Einsparung an

Energie erzielt werden. Außerdem trat ein nicht tolerierbarer Werkzeugverschleiß auf.

Beim Schmiermittelverbrauch und bei den damit verbundenen Kosten ist durch die Minimierung bzw. Vermeidung des Kühlschmiermitteleinsatzes eine Reduktion der Kosten zu erwarten. Allein die Kosten für Kühlschmiermittel sind durch den Einsatz von MMS um bis zu 94 % niedriger. Bei Trockenbearbeitung würden diese Kosten ganz entfallen.

Schlussendlich wird deutlich, dass die Frage nach der effizientesten Kühlschmierstrategie nicht allgemeingültig beantwortet werden kann. Der Einsatz von MMS verringert im Vergleich zu Emulsion den notwendigen Einsatz von Direktenergie pro Bohrung und den Kühlschmiermittelverbrauch, jedoch steigen der Werkzeugverschleiß und damit die Kosten für die Ressource Werkzeug, die notwendige Energie für Werkzeugwechsel und die Kosten für die nicht produktive Zeit während des Werkzeugwechsels an. Bei der gänzlichen Vermeidung von Kühlschmiermittel kann die Effizienz bezüglich Energie im Vergleich zu MMS nicht weiter gesteigert werden. Des Weiteren wird durch den gänzlichen Verzicht von Schmierung die Werkzeugstandzeit drastisch reduziert.

Der verwendete Werkstückwerkstoff Grauguss gilt als sehr einfach zu bearbeitender Werkstoff. Der hohe Kohlenstoffanteil führt zu graphitartigen Phasen, welche eine Art Schmiereffekt zwischen Werkstück und Werkzeug bei der Zerspanung hervorrufen. Auch die Nebenprodukte Span und Grat sind bei diesem Werkstoff als unproblematisch einzuordnen. In kommenden Untersuchungen wird die Effizienz bei der Bearbeitung eines Vergütungsstahles untersucht, bei welchem die Anforderungen an das Kühlschmiersystem bezüglich Schmierung, Kühlung und Spanabfuhr deutlich erhöht sind.

Acknowledgment

Die Autoren danken der europäischen Union (Europäischer Fonds für regionale Entwicklung) und dem Freistaat Sachsen für die Förderung des Spitzentechnologieclusters „Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik“ (eniPROD®).



Literaturangaben

- [1] *International Energy Agency IEA: World Energy Outlook 2009*, 2009
- [2] *Shell International BV: Shell energy scenarios to 2050*, 2008, URL: www.static.shell.com/ [11.08.2010]
- [3] *Baumgartner, W.; Ebert, O.; Weber, F.: Der Energieverbrauch der Industrie, 1990-2035*, Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2006 URL: www.bfe.ch [11.08.2010]
- [4] *Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft - Projektgruppe Nutzenergiebilanzen*, 2009
- [5] *Wolfram, H.: Hauterkrankungen durch Schmierstoffe*, 9. Internationales Kolloquium „Ökologische und ökonomische Aspekte der Tribologie“, Osterfildern, Technische Akademie Esslingen, 1994
- [6] *Dornfeld, D.A.: Sustainable Manufacturing – Greening Processes, Systems and Products*, Proceedings of the Sustain-able Production for Resource Efficiency and Ecomobility, International Chemnitz Manufacturing Colloquium, Verlag Wissenschaftliche Scripten, Chemnitz, 2010
- [7] *Dudas, I.; Varga G.: Umweltgerechte Zerspanungstechnik, Reduzierung und Ersatz von Fertigungshilfsstoffen beim Bohren*, European Community Project, Report N.: STD - 2EC, ERB CIPACT 930167, Dept. of Production Engineering, Vol. 7, 1996
- [8] *Hoffmann Company Nürnberg Qualitätswerkzeuge, Hauptkatalog 2010/2011*
- [9] *Weinert, K.: Trockenbearbeitung und Minimalmengenkühlschmierung: Einsatz in der spanenden Fertigungstechnik*, Springer Verlag, Berlin et al., 1999