

Reibungsreduzierung durch Ultraschallanregung in der Umformtechnik

Michael Schneeweiß^a, Jan Glühmann^a, Andreas Zinke^a, Thomas Druwe^b,
Mike Popp^b*, Martin Hamm^b

^a Westsächsische Hochschule Zwickau

^b Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik

* mike.popp@iwu.fraunhofer.de

Abstract

Sowohl ökologische als auch ökonomische Forderungen führen zu einer stetigen Weiterentwicklung von Produktionsprozessen, wobei die Senkung des Energie- und Ressourcenverbrauches einen hohen Stellenwert einnimmt. Vor diesem Hintergrund untersucht der Beitrag die vorteilhafte Nutzung von Ultraschall in Prozessen der Massivumformung. Ausgangspunkt der vorwiegend experimentellen Arbeit ist der bekannte Effekt der Reibkraftreduzierung bei ultraschallangeregten Tribosystemen. Mit speziell entwickelten Testmethoden wird das Reibverhalten ultraschallbeeinflusster Gleitsysteme bei unterschiedlichen, für Umformprozesse charakteristischen Bedingungen ermittelt.

1 Ausgangssituation

In vielen technischen Anwendungen außerhalb der Massivumformung werden schwingfähige Systeme angewandt, um Reibungskräfte zu reduzieren. Bekannt sind u. a. niederfrequente Rüttelplatten, Rüttelstampfer oder Fördersysteme. Die Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der schwingungsüberlagerten Gleitsysteme konzentrierten sich bisher hauptsächlich auf die Analyse der Wirkzusammenhänge, die zur Beeinflussung der Reibmechanismen führen. Es wurde festgestellt, dass sich der Reibungskoeffizient unter Einfluss mechanischer Schwingungen stark reduziert und unter bestimmten Umständen eliminiert werden kann [1]. Das erste qualitative Modell zum Einfluss von Ultraschallschwingungen basiert auf zahlreichen Untersuchungen von Storck et al. [2], [3]. Entsprechend dieser Arbeiten ist theoretisch eine nahezu vollständige Aufhebung der sonst wirkenden Reibungskräfte möglich. Popov et al. stellten in ihrer Arbeit heraus, dass im Gegensatz zum theoretischen Modell auch bei einer Oszillation immer eine statische Reibungskraft auftritt [4], [5]. Zudem wurde festgestellt, dass der Effekt einer Verminderung des Reibungskoeffizienten mit abnehmender Geschwindigkeit und anwachsender Amplitude am größten ist.

In der Fertigungstechnik ist die Ultraschallanregung, also die Überlagerung einer oder mehrerer Bewegungen mit einer Schwingung im Ultraschallbereich, aus verschiedenen Anwendungen bekannt. In der Trenntechnik sind dies z. B. das Ultraschallschwinglappen [6], das Ultraschallschneiden [7] sowie das Ultraschallbohren mit geometrisch bestimmter Schneide [8]. Bei diesen Verfahren wird vorwiegend die Reduktion der Trenn- und Reibungskräfte infolge der Ultraschallüberlagerung ausgenutzt, um positive Effekte wie bspw. verringerte Bauteildeformationen, reduzierte Oberflächenrauheit und verminderte Aufbauschneidenbildung zu erzielen. In der Füge-technik ist das Ultraschallschweißen, das als Punkt- oder Nahtschweißen

ausgeführt werden kann, eine bekannte wirkenergieunterstützte Verfahrensvariante, bei der Ultraschall zur Erwärmung der Fügepartner (Kunststoffe) durch Molekular- und Grenzflächenreibung genutzt wird [9].

Innerhalb der Umformtechnik, speziell in der Massivumformung sind keine industriell genutzten Anwendungsfälle der Ultraschallschwingungsanregung bekannt. Auf der Grundlage anwendungsnaher Untersuchungen zum Drahtziehen wurden die positiven Effekte schwingungsbeaufschlagter Umformwerkzeuge u. a. durch Pohlmann und Lehfeld diskutiert [10]. Durch deren Anwendung konnte eine deutliche Verringerung der erforderlichen Ziehkraft von bis zu 47 Prozent bei unterschiedlichen Materialien und Reduktionsgraden durch Senkung der Reibkraft erreicht werden.

2 Problemstellung und Ziel

Trotz der Kenntnis über die reibungsminimierende Wirkung des Ultraschalls werden schwingungsüberlagerte Prozesse in der Massivumformung wenig eingesetzt. Das Ziel besteht demnach darin, fehlendes Wissen zur Wirkung des Ultraschalls in Verbindung mit den für Umformverfahren charakteristischen tribologischen Bedingungen zu erarbeiten und die vorteilhafte reibungsmindernde Wirkung des Ultraschalls nachzuweisen. Grundlegende Voraussetzung für eine vorwiegend experimentelle Nachweisführung ist die Kenntnis der für Umformverfahren charakteristischen tribologischen Bedingungen und deren Abbildung in einem geeigneten Versuchsaufbau. Im Einzelnen sind folgende Arbeitsziele Ausgangspunkt der Untersuchung:

- Entwicklung eines Versuchsaufbaus zur experimentellen Charakterisierung ultraschallüberlagerter Massivumformprozesse (Analogieversuch)
- Ermittlung grundsätzlicher Reibungseffekte unter Ultraschalleinfluss
- Potentialbewertung der Ultraschallanwendung für industrielle Massivumformprozesse

3 Lösungsweg und Methoden

Die Analyse zum Verhalten von Gleitsystemen unter Ultraschalleinfluss erfolgt vorwiegend in vergleichenden Testreihen, mit zwei speziell entwickelten Versuchsaufbauten: Dem Ultraschall-PIN-Verfahren, der zum Nachweis grundsätzlicher Reibungseffekte, bei geringen Anpresskräften zwischen den Gleitpartnern genutzt wird und dem als Analogieversuch konzipierten Ringeinpresstest, der die Abbildung umformcharakteristischer Reibbedingungen ermöglicht. Das heißt, es lassen sich Fugendrucke einstellen, die in vergleichender Abmessung auch beim Fließpressen auftreten. Es wird somit, bei einem ausreichend hohen Fugendruck, eine Plastifizierung im oberflächennahen Bereich der Proben erzielt, so dass umformähnliche Kontaktbedingungen vorherrschen.

Zur numerischen Analyse der Testbedingungen wird im Rahmen der Arbeit die Finite-Elemente-Methode (FEM) genutzt. Dies betrifft die Abbildung des statischen Einpressvorganges, insbesondere die Ermittlung der bei unterschiedlichen Parametersets auftretenden Fugendrucke. Eine weitere Aufgabe der FEM besteht in der Abschätzung der unter Versuchsbedingungen zu erwartenden mechanischen

Lasten sowie der Vorhersage des Schwingverhaltens der ultraschallangeregten Komponenten. Auf der Grundlage dieser Informationen erfolgt die mechanische Auslegung des Ringeinpresstests, die mechanische und energetische Dimensionierung des Schwingensystems sowie die Auswahl geeigneter Messtechnik zur Erfassung der Einpresskraft, der Durchpressgeschwindigkeit, der Frequenz und Amplitude.

3.1 Ultraschall-PIN-Verfahren

Mit dem Ultraschall-PIN-Verfahren (**Abbildung 1**) können Reibkraftänderungen unter Ultraschalleinfluss bei verhältnismäßig kleinen Prozesskräften analysiert werden. Dabei wird ein Gegenkörper mit definierter Geometrie unter Wirkung einer Normalkraft translatorisch gegenüber dem Grundkörper bewegt. Wesentliche Elemente des Tribosystems wie Gleitpartner, Zwischenmedium und Beanspruchungskollektiv können variiert und hinsichtlich der Wirkung auf den Reibkoeffizienten bei Ultraschalleinkopplung untersucht werden.

Ultraschall-PIN-Verfahren

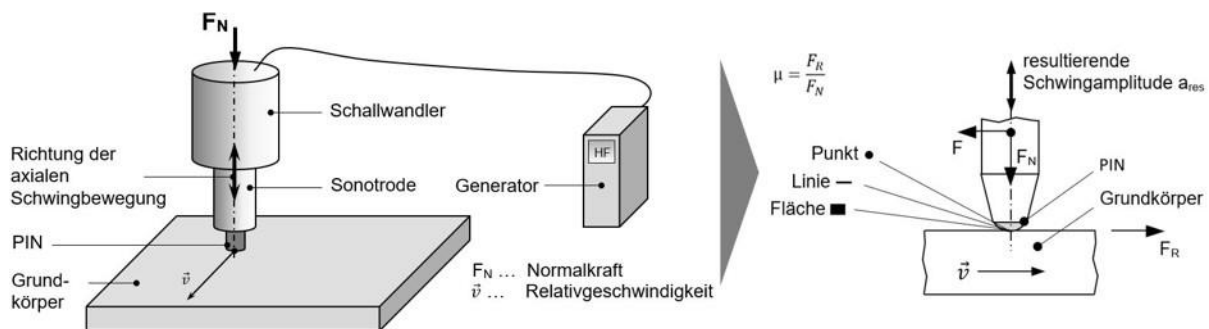


Abbildung 1: Prinzip des Ultraschall-PIN-Verfahrens

3.2 Analogieversuch - Ringeinpresstest

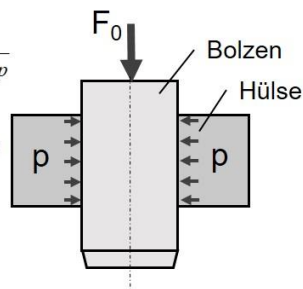
Das Prinzip des Ringeinpresstests besteht darin, dass eine zylindrische Probe mit Übermaß in die Bohrung einer Hülse gepresst wird. Durch eine gezielte Einstellung des Übermaßes können radiale Spannungen bis 1.000 N/mm² erzeugt werden. Dabei findet jedoch keine wesentliche Formänderung statt, so dass die experimentell erfasste Einpresskraft weitestgehend der Reibkraft entspricht. Die Erweiterung des Versuchsaufbaus um eine Ultraschallanregung ermöglicht zudem die Analyse der resultierenden Reibbedingungen und -effekte durch die Schwingungsüberlagerung. Zur Beurteilung des Verschleißverhaltens werden zusätzlich die Oberflächen der wieder ausgepressten Probekörper visuell auf Verschleißmarken untersucht. Ein Reibkoeffizient nach COULOMB kann aus dem Verhältnis der bezogenen Einpresskraft und der auf Basis einer FE-Simulation ermittelten Fugenpressung berechnet werden. Durch eine Modifikation des Versuchsaufbaus werden Analogien zu den bei Massivumformverfahren charakteristischen Umformbedingungen hergestellt. Dies betrifft u. a. den Fugendruck, die Einpressgeschwindigkeit, die Gleitlänge, die Einpresstemperatur sowie die Reibbedingungen zwischen den Gleitpartnern.

Das Prinzip des Ringeinpresstests sowie eine Möglichkeit der Ultraschallerweiterung ist in der **Abbildung 2** dargestellt.

Ringeinpressversuch

$$\mu = \frac{\tau}{p} = \frac{F_R}{F_N} = \frac{F}{\pi d_F h p}$$

F ... Einpresskraft
 d_F ... Fugendurchmesser
 H ... Hülse
 p ... Fugendruck



Ultraschallerweiterung

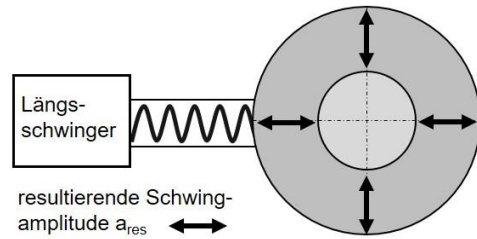


Abbildung 2: Prinzip des Ringeinpresstests mit möglicher Ultraschallerweiterung

4 Experimentelles

4.1 Ultraschall-PIN-Verfahren

Für die experimentellen Untersuchungen zum Ultraschall-PIN-Verfahren wird eine verfügbare Nachbehandlungsanlage der Fa. Hermann-Ultraschalltechnik genutzt, die in einem Fräszentrum vom Typ Chiron Mill800, zur Realisierung der translatorischen PIN-Bewegung, integriert ist. Als Gegenkörper wird ausschließlich ein verschleißresistenter Hartmetall-PIN (K10, **Abbildung 3**) verwendet, der sowohl mit als auch ohne Ultraschallanregung geradlinig über den Grundkörper geführt wird. Die messtechnische Erfassung der Normalkraft sowie der normal dazu wirkenden Reibungskraft erfolgt mittels Kraftmessplattform KISTLER, Typ 9255.



Abbildung 3: PIN-Gestaltung: Einschraub-PIN mit Hartmetalleinsatz (K10)

4.2 Analogieversuch - Ringeinpresstest

Zur Durchführung der Ringeinpressversuche mit und ohne Ultraschallerweiterung wird ein Bolzen mit einem definierten Übermaß durch eine Hülse mit 6 mm Nennmaß, unter den in **Tabelle 1** aufgeführten Versuchsbedingungen gepresst. Sowohl Hülse als auch Bolzen (**Abbildung 4**) sind ausschließlich für eine einmalige Verwendung vorgesehen und entsprechend der Spezifikation in **Tabelle 2**. Zur Aufbringung der notwendigen Einpresskraft ist eine hydraulische Einständerpresse vorgesehen. Die Messung der Presskraft erfolgt mittels Piezo-Kraftsensor.

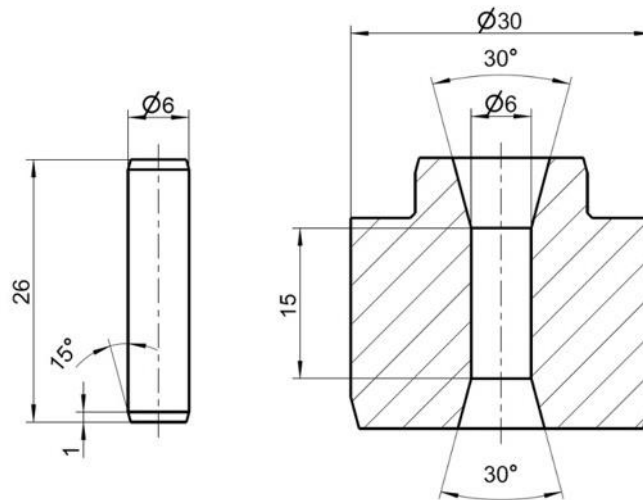


Abbildung 4: Probengeometrie: Bolzen, Hülse

Tabelle 1: Versuchsbedingungen

Werkzeugmaschine	
- Typenbezeichnung:	PYE63 S1M
- Hersteller:	Zeulenroda Presstechnik GmbH
- Nennkraft:	630 kN
- Stößelgeschwindigkeit:	15 mms ⁻¹
Kraftmesstechnik	
- Typenbezeichnung:	Piezo Kraftsensor 9061A
- Hersteller:	Kistler Instrumente GmbH
- maximale Messkraft:	200 kN
- Ladungsverstärker:	Kistler 5017
Ultraschalltechnik	
- Hersteller:	Hielscher Ultrasonics GmbH
- Generator:	20 kHz / 1000 W
- Schallwandler:	UIP1000hd
- Frequenz:	20,5 kHz
- Amplitude in Einpressrichtung:	4 µm

Tabelle 2: Spezifikation der Versuchsproben

Versuchs-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Übermaß [µm]	10	15	20	25	30	35	40	45	10	15	20	30	40
Werkstoff Hülse	C35 (1.0501)								C45 (1.0503)				
Werkstoff Bolzen	X155 CrMoV12-1 (1.2379) 55+4 HRC												

Die Ultraschallschwingungen werden durch einen Ultraschallwandler UIP1000hd des Herstellers Hielscher mit dazugehörigem Ultraschallgenerator erzeugt. Dieser resonant betriebene piezobasierte Schwingungswandler kann in einem Frequenzbereich um die 20 kHz eingesetzt werden, verfügt über eine Leistungsaufnahme von 1000 W und erzeugt am ausgehenden Schwingerende eine maximale Amplitude von bis zu 10 µm. Die Baugröße des Schwingungswandlers und

Matrize erzielt. Um die mechanische Belastung der Verbindungsstellen zwischen den Einzelkomponenten möglichst gering zu halten, sind die Verbindungsstellen in Bereichen von Schwingungsbäuchen mit geringen Dehnungen und damit geringen mechanischen Spannungen umgesetzt. Aufgrund der minimalen Schwingungsamplituden und damit der geringsten Schwingungsübertragung nach außen, eignen sich die Schwingungsknoten für die Anbindung der Schwingungsanregung nach außen. So wird die Schwingungsanregung jeweils am Schwingungswandler und am Matrizenhalter in einem Schwingungsknoten an einen Halterahmen angebunden. Der Halterahmen dient im späteren Versuchsbetrieb der Aufnahme der Pressenkräfte und zur Positionierung des Aufbaus auf dem Pressentisch (**Abbildung 6**).

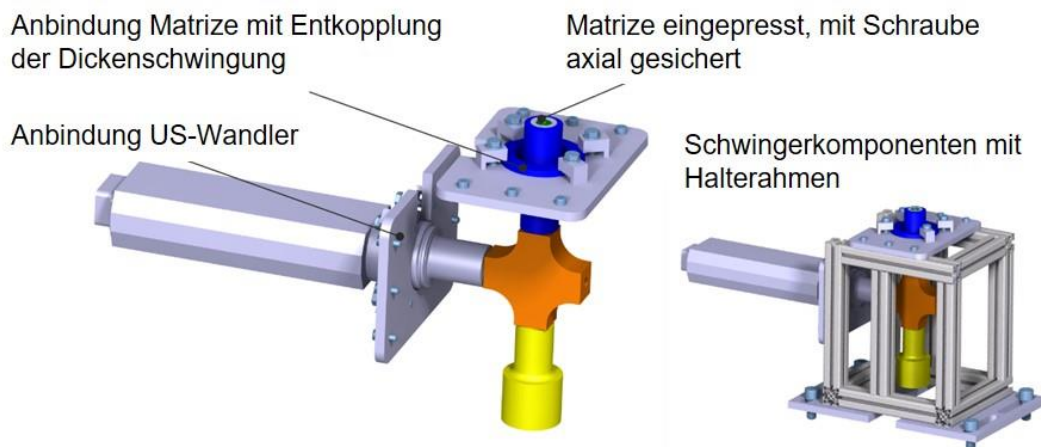


Abbildung 6: Gesamtkonstruktion mit Anbindung der Schwingerkomponenten

Zur Identifikation von Wirkzusammenhängen und zur weiteren Analyse der Testbedingungen wird der Ringeinpresstest zusätzlich in einer FE-Simulation abgebildet. Die auftretenden Spannungen und deren Einfluss auf den resultierenden Fugendruck kann somit begleitend zum Experiment ermittelt werden. Die Kraftkurven weisen sowohl für niedrige als auch für hohe Übermaße charakteristische Verläufe auf (**Abbildung 7**). Bei einem vergleichsweise kleinen Übermaß wird der Ring beim Durchpressen des Bolzens lediglich elastisch verformt. Die Presskraft verhält sich dabei proportional zur Kontaktfläche und steigt linear während des Einpressvorganges an. Die Presskraft erreicht das Maximum nach dem vollständigen Einpressen des Bolzens. Während des anschließenden Auspressens fällt die Kraft stetig ab. Wird aufgrund des gewählten Übermaßes im Ring die Fließspannung erreicht, kommt es zu einer plastischen Verformung. Ab diesem Punkt wird kein rein elastisches Verhalten mehr abgebildet, was zu einer veränderten Charakteristik der Kraftkurve führt. Ein Abgleich der Ergebnisgrößen durch Anpassung des Reibmodells erfolgt anhand der experimentell zu erfassenden Kraft-Weg-Verläufe. Auf diese Weise kann den Versuchen zudem ein Reibkoeffizient zugeordnet werden, was eine Quantifizierung des Ultraschalleinflusses auf das Reibverhalten ermöglicht.

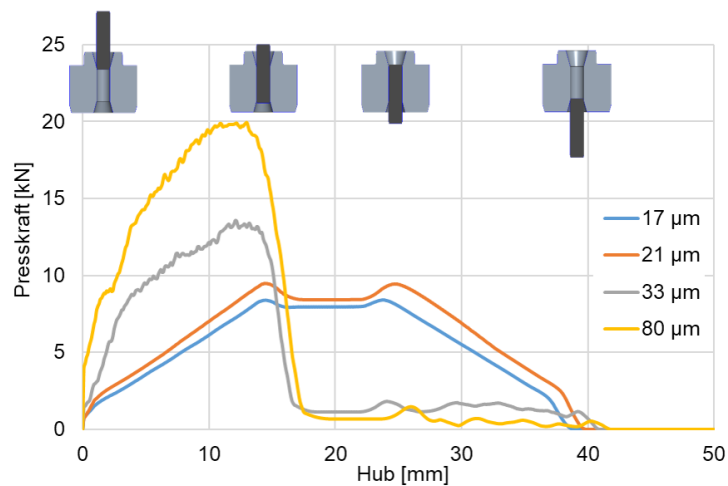


Abbildung 7: Presskraftverlauf in Abhängigkeit vom Übermaß, ermittelt mittels FEM

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Ultraschall-PIN-Verfahren

Die experimentellen Analysen mittels Ultraschall-PIN-Verfahren konzentrieren sich zu Beginn auf die Ermittlung des Einflusses wichtiger Verfahrensparameter (wie beispielsweise Relativgeschwindigkeit v_0 und Schwingungsamplitude a) auf den Reibungskoeffizienten μ .

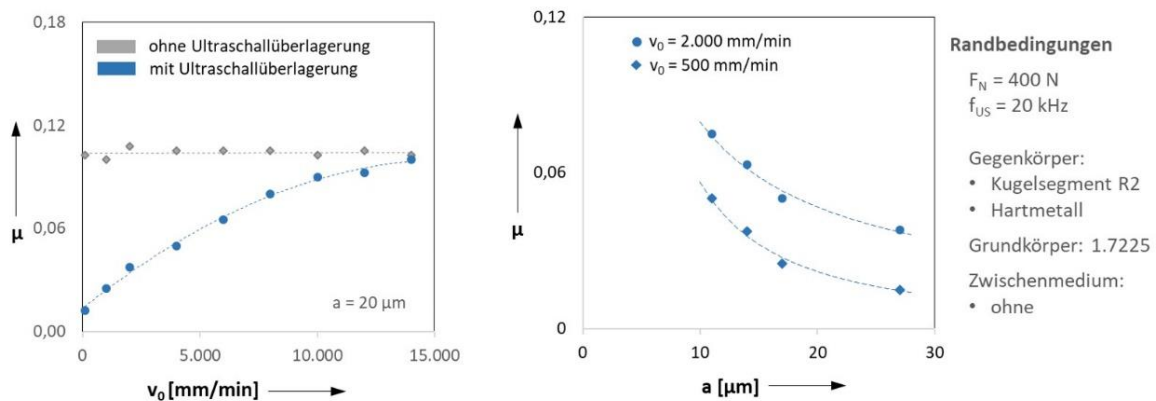


Abbildung 8: Geschwindigkeits- und Amplitudeneinfluss unter den Bedingungen des Ultraschall-PIN-Verfahrens

Dabei bestätigen die gewonnenen, in **Abbildung 8** dargestellten Ergebnisse die aus der Literatur bekannte Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten μ von der Relativgeschwindigkeit (linkes Teilbild) sowie der Schwingamplitude (rechtes Teilbild). Die prinzipielle Eignung des entwickelten Ultraschall-PIN-Verfahrens zur Analyse des Einflusses wesentlicher Elemente des Tribosystems auf den Reibungskoeffizienten μ ist somit gegeben.

Die Untersuchungen zur Variation wichtiger Elemente des Tribosystems ist beispielhaft für den Grundkörperwerkstoff und die Normalkraft F_N in **Abbildung 9** dargestellt.

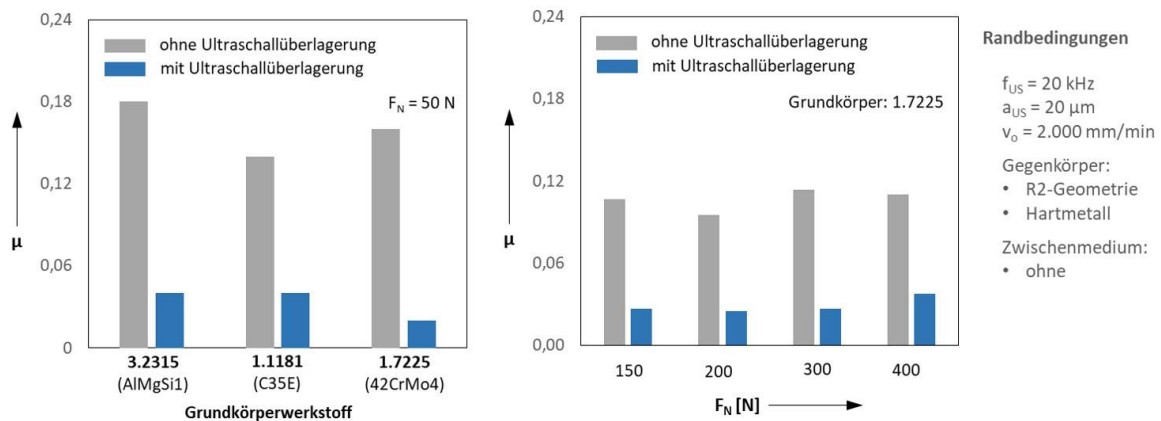


Abbildung 9: Werkstoff- u. Normalkrafteinfluss unter den Bedingungen des Ultraschall-PIN-Verfahrens

Hierbei wird deutlich, dass mittels Ultraschallüberlagerung eine generelle Reduktion des Reibungskoeffizienten μ zu erreichen ist. Diese beträgt für die dargestellten Randbedingungen zwischen 70 und 90 Prozent.

Die Ergebnisse zum Grundkörperwerkstoff (**Abbildung 9**, linkes Teilbild) machen weiterhin deutlich, dass für die in Betracht kommenden Materialien kein signifikanter Werkstoffeinfluss zu erwarten ist. Weiterhin ist bis zu einer Normalkraft von 400 N (**Abbildung 9**, rechtes Teilbild) keine Normalkraftabhängigkeit des Reibungskoeffizienten nachweisbar.

5.2 Analogieversuch - Ringeinpresstest

Die experimentell erfassten Kraft-Weg-Verläufe weisen nicht die in der FEM ermittelte ideale Form auf. Ursache hierfür sind die bei der Modellbildung nicht abgebildeten Einflüsse von Maschine, Prüf- und Messeinrichtung. Dennoch sind die veränderten Charakteristiken der Kraftverläufe bei steigender Pressung erkennbar. In der **Abbildung 10** sind die Kraft-Weg-Kurven für ein elastisches Verhalten (linkes Teilbild) bei einem Übermaß von $10 \text{ }\mu\text{m}$ und vergleichend ein plastisches Verhalten (rechtes Teilbild) bei einem Übermaß von $25 \text{ }\mu\text{m}$ dargestellt (**Abbildung 7**).

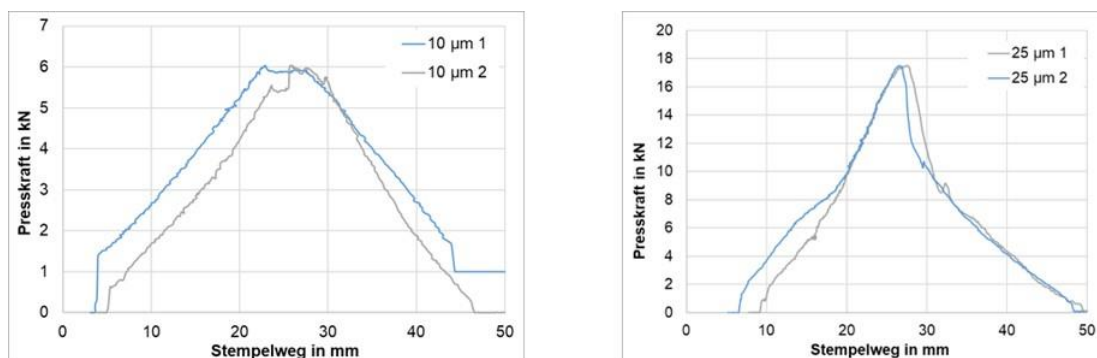


Abbildung 10: Kraftverläufe beim statischen Ringeinpresstest

Bei den Versuchen mit Schwingungsanregung konnten für alle untersuchten Parameterkombinationen eine Verringerung der Presskräfte festgestellt werden. Dies

ist auf die Verringerung der Reibung infolge des Ultraschalleinflusses zurückzuführen. Deutlich wird dies an den Kraftverläufen der Einpressversuche (**Abbildung 11**).

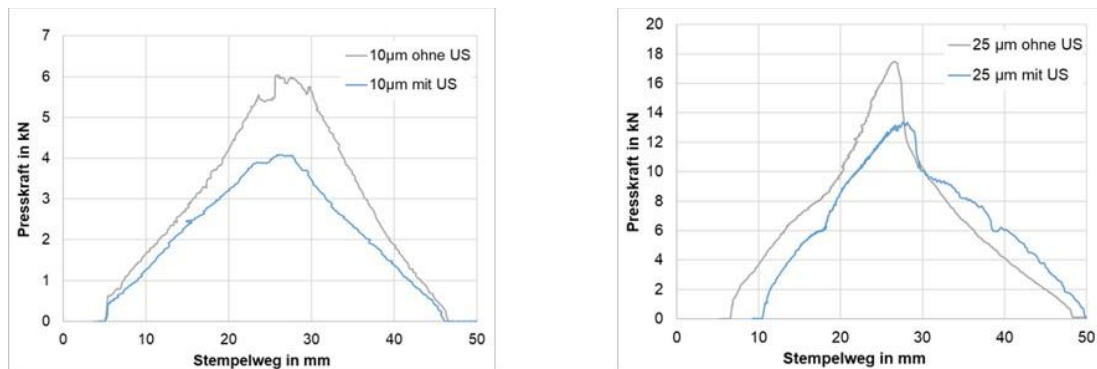


Abbildung 11: Kraftreduktion beim Ringeinpressversuch mit Ultraschall

Nachfolgend sind die gemessenen Maximalkräfte sowie die Kraftreduktion durch Ultraschall für Versuche mit dem Werkstückwerkstoff C35 in einer Übersicht dargestellt (**Abbildung 12**).

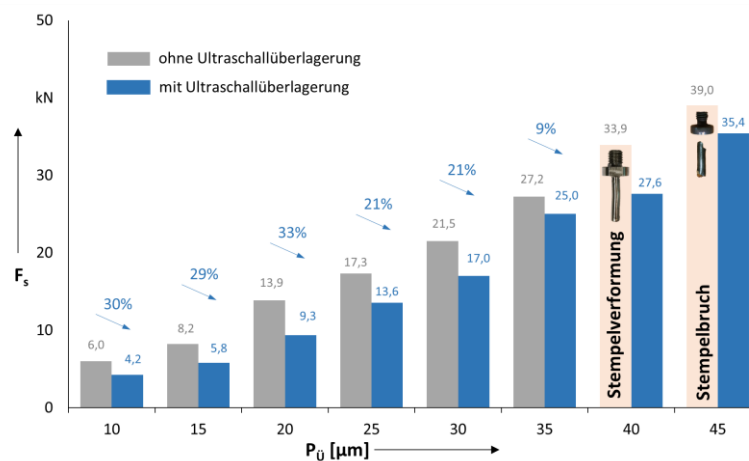


Abbildung 12: Maximalkräfte der Ringeinpressversuche mit C35

Es ist zu erkennen, dass über die gesamte Versuchsreihe eine Kraftreduktion zu verzeichnen ist. Diese liegt für geringe Übermäße bei 25 bis 35 Prozent. Bei Überschreitung eines Übermaßes von 30 μm wird der Effekt der Kraftminderung geringer. Die Ursache hierfür wird in der Leistungsgrenze des Schwingensystem gesehen. Mit zunehmender Pressenkraft wird entsprechend mehr Ultraschalleistung benötigt, um die gewünschten Amplituden zu erreichen. Diese benötigte Ultraschalleistung steigt überproportional an, da das schwingende System mit steigender Pressenkraft nicht nur stärker belastet, sondern auch verstimmt wird und zunehmend außerhalb der Resonanz arbeiten muss. Es kann davon ausgegangen werden, dass mit einer entsprechend leistungsfähigeren Ultraschalltechnik und ausreichenden Amplituden auch bei größeren Pressungen eine entsprechende Kraftreduzierung erreicht werden kann. In **Abbildung 13** ist die gemessene Leistungsaufnahme des Ultraschallgenerators in Abhängigkeit des Übermaßes dargestellt.

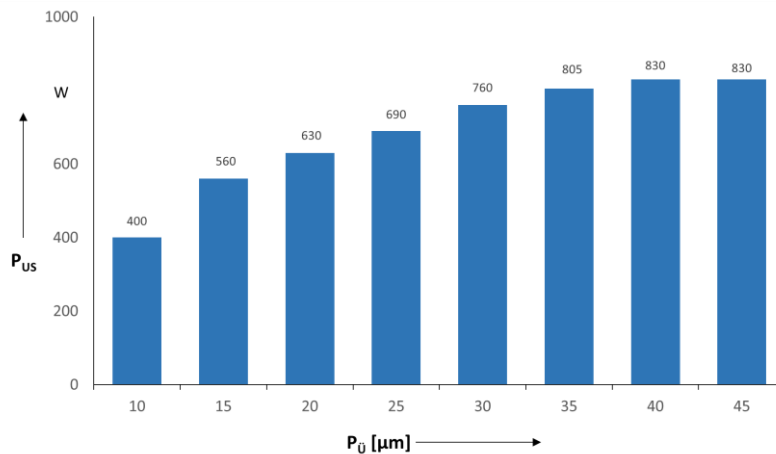


Abbildung 13: Leistungsaufnahme P_{US} des US-Generators

Als Ergebnis der Versuche mit dem Werkstoff C45 kann ebenfalls eine signifikante Reduzierung der Presskraft von 19 bis 27 Prozent festgestellt werden (**Abbildung 14**). Auch hier konnten die Versuche unter dynamischen Bedingungen noch bis zu einem Übermaß von 40 μm durchgeführt werden, während im vergleichenden statischen Versuch der Pressdorn aufgrund der höheren Belastung versagte.

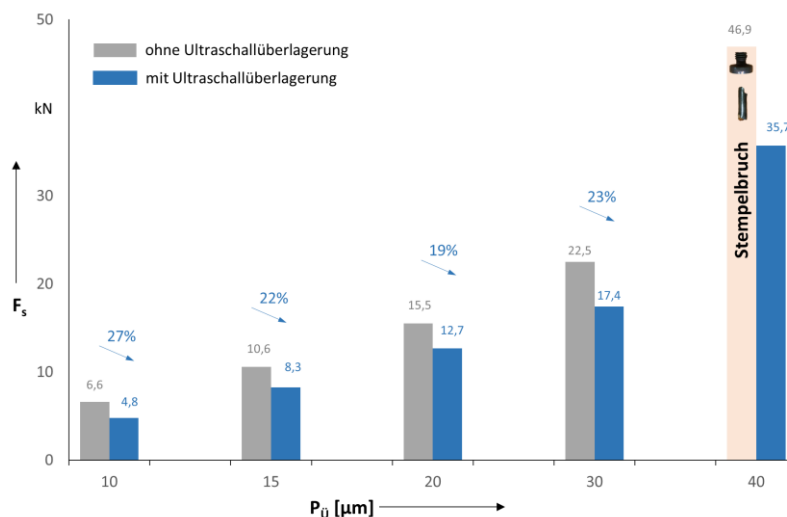


Abbildung 14: Maximalkräfte der Ringeinpressversuche mit C45

Die Versuche, die mit molybdänhaltigem Schmierstoff durchgeführt wurden, ergaben eine maximale Verringerung der Presskraft gegenüber dem ungeschmierten Zustand von 24 Prozent. Somit kann durch die Ultraschallanregung eine vergleichbare oder sogar höhere Kraftreduzierung wie durch geeignete Schmierstoffe erreicht werden. Die Oberflächen der Bolzen aus den Versuchen mit Ultraschall zeigten keinen abrasiven Verschleiß, während die Bolzen, die ohne Schwingungsanregung und ohne Schmierung eingesetzt wurden deutlichen Oberflächenverschleiß aufwiesen (**Abbildung 15**).

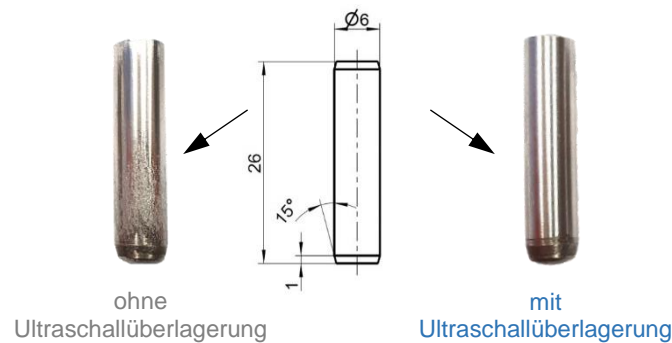


Abbildung 15: Verschleißminderung trocken durchgeführter Ringeinpresstest (Übermaß 25 µm) mit Ultraschallüberlagerung

6 Zusammenfassung

Mit einem gesondert entwickelten Ultraschall-PIN-Verfahren wurde der Ultraschalleinfluss bei vergleichsweise geringen Normalkräften und unter Variation tribologisch relevanter Parameter wie Gleitgeschwindigkeit, Werkstoffpaarung und Schmierstoffzustand untersucht. Im Ergebnis konnte u. a. eine signifikante Reduzierung der Reibkräfte von bis zu 90 Prozent gegenüber einer statischen Gleitbewegung nachgewiesen werden. Zur Analyse des Reibverhalten ultraschallbeeinflusster Gleitsysteme, unter besonderer Berücksichtigung der für Umformprozesse charakteristischen Flächenpressung, wurde ein spezieller Analogieversuch entwickelt. Dieser basiert auf einem Durchpressvorgang und ermöglichte neben der definierten Variation des Paarungsübermaßes, die Einstellung der Werkstoffkombination, der Oberflächentopographie und der Gleitgeschwindigkeit. Der Versuchsaufbau gestattet zudem Erkenntnisgewinne hinsichtlich des Einflusses der Flächenpressung auf das Reibverhalten ultraschallbeeinflusster Gleitsysteme und zeigt, dass auch mit zunehmendem Kontaktdruck zwischen den Gleitpartnern eine Reibkraftreduktion von bis zu 35 Prozent realisierbar ist.

Eine abschließende Bewertung der experimentellen Ergebnisse verdeutlicht das Potential des Ultraschalls. Allgemein betrachtet kann durch dessen Anwendung für geeignete Verfahren der Massivumformung eine Erweiterung bestehender reibungsbedingter Verfahrensgrenzen, eine Senkung des Materialeinsatzes durch verbesserte umformende Herstellungsmöglichkeiten, eine Verlängerung der Werkzeugstandzeiten, einer Reduzierung des Schmiermittelbedarfes, der Vermeidung chemischer Oberflächenbehandlungen sowie der Verbesserung der Werkstückqualität in Aussicht gestellt werden.

Literatur

- [1] D. Godfrey, „Vibration Reduces Metal to Metal Contact and Causes an Apparent Reduction in Friction,“ *Tribology Transactions*, Nr. 10, pp. 183-192, 1967.
- [2] W. Littmann, H. Storck und J. Wallaschek, „Littmann, Sliding friction in the presence of ultrasonic oscillations: superposition of longitudinal oscillations,“ *Archive of Applied Mechanics (Ingenieur Archiv)*, Nr. 71, pp. 549-554., 2001.
- [3] H. Storck, „The effect of friction reduction in presence of ultrasonic vibrations and its relevance to travelling wave ultrasonic motors,“ *Ultrasonics*, Nr. 40, pp. 379-383., 2002.
- [4] V. L. Popov, J. Starcevic und A. E. Filippov, „Influence of Ultrasonic In-Plane Oscillations on Static and Sliding Friction and Intrinsic Length Scale of Dry Friction Processes,“ *Tribology Letters*, Nr. 39, pp. 25-30., 2009.
- [5] V. L. Popov, *Kontaktmechanik und Reibung*, Popov, V. L.: *Kontaktmechanik und Reibung: Von der Nanotribologie bis zur Erdbebendynamik*, Berlin: Springer Verlag, 2010.
- [6] W. König und F. Klocke, *Fertigungsverfahren 3, Abtragen und Generieren*, Berlin: Springer Verlag, 1997.
- [7] S. Zahn, „Ultraschallschneiden von Lebensmitteln, Dissertation,“ TU Berlin, Fakultät für Verkehrs- und Maschinensysteme, Berlin, 2008.
- [8] M. Schneeweiß und J. Glühmann, „Ultraschallunterstützte Bearbeitung – Innovationen in der Fertigungstechnik,“ in *5. Symposium „Produktionstechnik – innovativ und interdisziplinär*, Zwickau, 2015.
- [9] J. Sackmann, „Ultraschallfertigung zur Herstellung mikrofluidischer Systeme, Dissertation,“ RWTH Aachen, Fakultät für Maschinenwesen, Aachen, 2015.
- [10] R. Pohlman und E. Lehfeldt, „Influence of Ultrasonic Vibration on Metallic Friction,“ *Ultrasonics*, Nr. 4, pp. 178-185, 1966.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der SAB Sächsische Aufbaubank für die Förderung der vorliegenden Arbeit im Rahmen des Programms InfraPro - Forschungsinfrastruktur und Forschungsprojekte im Bereich anwendungsnaher öffentlicher Forschung.



Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.