

Analyse und Modellierung der Schlagkraft beim elektro-dynamischen Festklopfen zur kraftbasierten Prozessauslegung

D. Trauth^{1*}, F. Klocke¹, F. Schongen, A. Shirobokov¹

¹Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen, Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c. F. Klocke, **Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. D. Trauth**, Dipl.-Ing. F. Schongen, M.Sc. RWTH Anton Shirobokov

*D.Trauth@wzl.rwth-aachen.de, Tel: +49 (0) 241 80-27999

Kurzzusammenfassung: Das Festklopfen ist ein umformtechnisches Fertigungsverfahren zur inkrementellen Oberflächenbearbeitung von technischen Bauteilen. Durch hochfrequente Schläge werden Rauheitsspitzen eingeglättet und hierdurch Druckeigenspannungen und Kaltverfestigung in die Randzone eingebracht. Die Schlagkraft ergibt sich beim elektro-dynamischen Festklopfen durch eine Wandlung elektrischer in mechanische Energie und schließlich durch die Übertragung dieser Energie auf das Werkstück. Die Schlagkraft ist aufgrund komplexer Einflüsse der elektrischen und mechanischen Größen während der Energiewandlung auf das Festklopfsystem nur schwer bestimmbar. Dieser Beitrag zeigt Modellierungsansätze auf, mit denen die resultierende Schlagkraft werkstoffabhängig bestimmt werden kann. Dadurch lassen sich gezielt Aussagen über die Höhe der Einglättung, der Kaltverfestigung und der induzierten Druckeigenspannungen in die Bauteilrandschicht ableiten. Bei geeigneter Auslegung der Bauteilrandschicht kann die Dauerfestigkeit und Verschleißbeständigkeit festgeklopfter Bauteile erhöht werden.

Schlüsselwörter: Festklopfen, Schlagkraft, Randschicht, Werkzeugbau

1. Einleitung

Das Festklopfen ist ein umformtechnisches Fertigungsverfahren zur inkrementellen Oberflächenbearbeitung von technischen Bauteilen [BLE112]. Durch hochfrequente Schläge eines Klopfkopfes werden Rauheitsspitzen einer Bauteiloberfläche eingeglättet und hierdurch Druckeigenspannungen und Kaltverfestigung in die Randzone eingebracht. Als Verfahrensvarianten kommen pneumatische, piezoelektrische oder elektro-dynamische Wirkprinzipien zur Erzeugung der hochfrequenten Schläge zum Einsatz, welche technologiebedingt unterschiedlich starke Effekte auf die Randschichteigenschaften eines Bauteils haben. [WIED11] Bei geeigneter Auslegung der Bauteilrandschichteigenschaften kann die Dauerfestigkeit und Verschleißbeständigkeit festgeklopfter Bauteile erhöht werden [MADE06].

Beim Festklopfen wird mit einem sphärischen Klopfkopf hochfrequent auf das zu bearbeitende Werkstück geschlagen. Der Frequenzbereich liegt je nach Wirkprinzip zwischen 20 und 500 Hz und

es können Kugelradien von 2 mm bis 20 mm verwendet werden. Das sphärische Werkzeug besteht aus Hartmetall oder gehärtetem Werkzeugstahl. Des Weiteren können beim Festklopfen die Prozessparameter Klopfrequenz, Klopfhub, Klopfabdruckabstand, Bahnabstand und Anstellwinkel variiert werden. [WIED11]

Jeder Aufschlag des Klopfkopfes auf das Werkstück wird in vier charakteristische Phasen eingeteilt, siehe Abbildung 1: In der **ersten** Phase steht der Klopfkopf in der Ausgangsstellung, dem oberen Totpunkt. Der Klopfkopf befindet sich hier in einer Ruhelage, die Geschwindigkeit ist null. Aus der Ruhelage wird der Klopfkopf während der **zweiten** Phase durch Anlegen einer Wechselspannung an eine Spule in Richtung des Werkstücks beschleunigt. Durch das entstehende Magnetfeld wird eine Spannung induziert, welche eine Lorentzkraft auf die beweglichen Komponenten des Klopfsystems hervorruft. Der Klopfkopf wird folglich beschleunigt. Der freie Hub bestimmt die

Länge des Beschleunigungswegs. Die **dritte** Phase beginnt, sobald es zum Kontakt zwischen Werkstück und Klopfkopf kommt. Voraussetzung für den Kontakt ist, dass der Abstand zwischen Klopfkopf und Werkstück kleiner als der freie Hub des Werkzeugs ist. Der Klopfkopf verformt das Werkstück, bis seine gesamte kinetische Energie in Verformungs- und Reibungsenergie umgewandelt wurde, die Kontaktkraft im Gleichgewicht mit der aufbrachten Last steht oder der Stößel in

wendung des Festklopfens ist es erforderlich, die für die Umformung maßgebliche Prozess- bzw. Schlagkraft zu kennen. Bei dem in diesem Beitrag untersuchten elektro-dynamischen Festklopfsystem ergibt sich die Schlagkraft durch eine Wandlung elektrischer in mechanische Energie und schließlich durch die Übertragung dieser Energie auf das Werkstück. Die Schlagkraft kann daher nicht direkt über eine Steuerung eingestellt werden, sondern wird u.a. über die Klopfhäufigkeit und

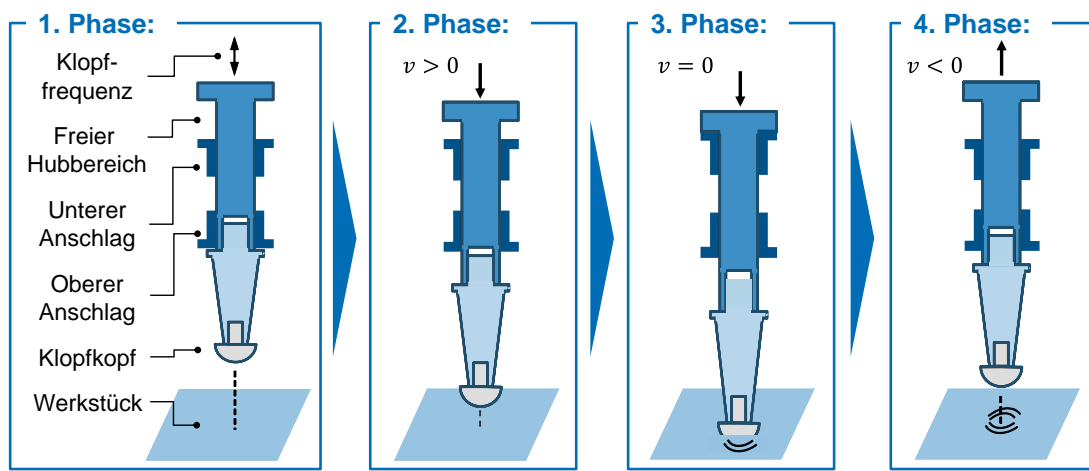


Abbildung 1: Verfahrensablauf beim Festklopfen, in Anlehnung an Wied [WIED11]

den unteren Anschlag fährt. Überschreitet die auftretende Spannung die Fließgrenze des Werkstückmaterials, bleibt ein plastischer Eindruck auf dessen Oberfläche zurück. In der **vierten** Phase wird der Klopfkopf zurück in die Ausgangsstellung versetzt. Dafür wird die Rückprallenergie aus der elastischen Verformung genutzt, welche den Klopfkopf nach Erreichen der maximalen Eindringtiefe zurückbeschleunigt. Des Weiteren werden über eine Rückstellfeder oder Magnete die schwingenden Komponenten des Klopfsystems in die Nulllage zurückgeführt. Neben der vertikalen Oszillation des Klopfkopfes wird dieser während der Klopfbearbeitung relativ zur Oberfläche des Werkstückes bewegt. Dafür wird das Werkzeug in eine Bearbeitungsmaschine integriert und kann somit eine definierte Oberflächenkontur abfahren. Dadurch ist auch eine maschinelle Bearbeitung von komplexen Oberflächengeometrien möglich.

Obwohl das Festklopffverfahren seit einiger Zeit bekannt ist, wurde es bisher nicht vollständig erforscht. Für eine wissensbasierte, industrielle An-

wendung des Festklopfens ist es erforderlich, die für die Umformung maßgebliche Prozess- bzw. Schlagkraft zu kennen. Damit reproduzierbare Ergebnisse für die Einglättung eines Werkstückes erzielt werden können, muss der Einfluss der Klopfhäufigkeit und des Klopfhubs auf die resultierende Schlagkraft während der Klopfbearbeitung bekannt sein.

Im Folgenden wird die innerhalb dieses Beitrags angewandte Vorgehensweise zur Modellierung der Schlagkraft beim Festklopfen vorgestellt. In einem ersten Schritt erfolgt die Generierung einer umfangreichen experimentellen Datenbasis anhand von Kraftmessungen zur Verifikation der numerischen Modelle. Diese Modelle zur Schlagkraftbestimmung werden mithilfe der numerischen Simulationssoftware MATLAB/Simulink aufgebaut. Hierdurch ist es möglich, die multiphysikalischen Randbedingungen des Festklopfens zu beschreiben. Durch Berücksichtigung geeigneter rheologischer Modelle zur Abbildung des Werkstoffverhaltens können aufbauend die Schlagkraft und Einglättung quantitativ bestimmt werden [RUST11, POPO09, HOLL45].

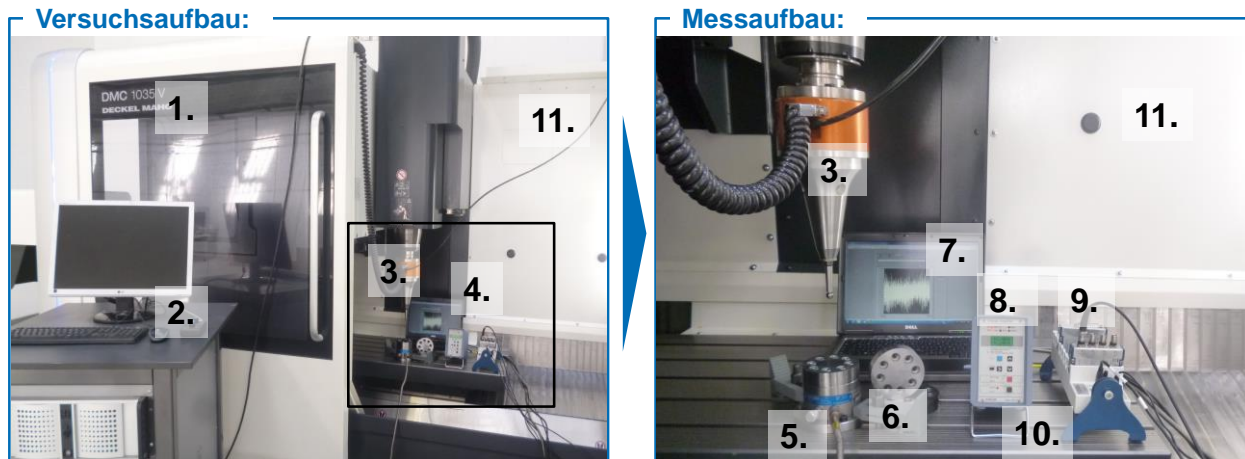


Abbildung 2: (1) 3-Achs-Vertikalfräsmaschine; (2) Klopfst Steuerung; (3) Klopfsystem der Fa. accurapuls; (4) Messapparaturen; (5) Messplattform zur Aufnahme einer Vertikalkraft; (6) Werkstück; (7) Laptop mit NI LabView; (8) Ladungsverstärker; (9) Messkarte; (10) Maschinentisch; (11) Maschinenraum

2. Experimentelle Kraftmessung

Den Aufbau der Versuchsdurchführung zeigt Abbildung 2. Die Schlagkraft wird über eine Messplattform der Firma Kistler (5) aufgenommen. Dabei ist das Klopfwerkzeug (3) der accurapuls GmbH in einer 3-Achs-Vertikalfräsmaschine DMC 1035V der Firma Deckel Maho eingespannt (1). Über die Steuerung der Fräsmaschine kann der Klopfkopf präzise an die gewünschte Position gefahren werden. An der Klopfst Steuerung (2) sind die Leistung und die Schlagfrequenz einstellbar. Das zu klopfende Werkstück (6) wird fest mit der Messplattform (5) und diese mit dem Maschinentisch (10) verschraubt. Die Schlagkraft wird über die Messapparatur (8) in ein elektrisches Signal umgewandelt und dann von einem digitalen Messinstrument (9) auf einem Laptop (7) mit der Software National Instruments LabVIEW 2011 visualisiert und gespeichert.

2.2 Versuchsdurchführung

Für die Klopfversuche zur Kraftmessung wurde ein elektro-dynamisches Klopfsystem der accurapuls GmbH verwendet. Die maximale Leistung beträgt 3,2 kW. Der Frequenzbereich liegt zwischen 20 und 400 Hz. Der freie Hub beträgt 1 mm. Innerhalb der Versuchsdurchführung wurden folgende Parameter variiert: Erhöhung des Klopfhubes von

0,001 mm auf 0,01 mm, auf 0,1 mm und daraufhin in 0,1 mm-Schritten bis 0,9 mm. Bei jeder Hubposition wurde die Klopfhäufigkeit in 20 Hz-Schritten von 400 Hz bis auf 20 Hz abgesenkt. Die Klopfleistung betrug konstant 3,2 kW. Es wurde ein Klopfkopf mit einem Durchmesser von 12 mm verwendet.

Entsprechend dem Shannon-Theorem wurde die Schlagkraft mit einer Abtastfrequenz von 2000 Hz gemessen. Hierdurch wird sichergestellt, dass bei einer Klopfhäufigkeit von 400 Hz das Signal hinreichend genau rekonstruiert werden kann [ABEL10]. Die Messung der Eigenfrequenzen des Messaufbaus ergab Resonanzfrequenzen von 650 Hz. Da die maximale Klopfhäufigkeit bei der Versuchsdurchführung 400 Hz beträgt, ist mit keiner signifikanten Amplitudenerhöhung aufgrund von Resonanz zu rechnen [ABEL10, HERI07].

2.3 Versuchsauswertung

In den durchgeführten Versuchen konnte beobachtet werden, dass der vom Klopfkopf zurückgelegte Weg mit der Frequenz variiert. Je höher die Frequenz f , desto kleiner wird der Weg s des Klopfkopfes. Aus den Versuchsergebnissen kann die Proportionalitätsbeziehung $s \sim 1/f^2$ abgeleitet werden. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, den freien Hub bei höheren Frequenzen durch eine präzise Zustellung zum Werkstück zu reduzieren.

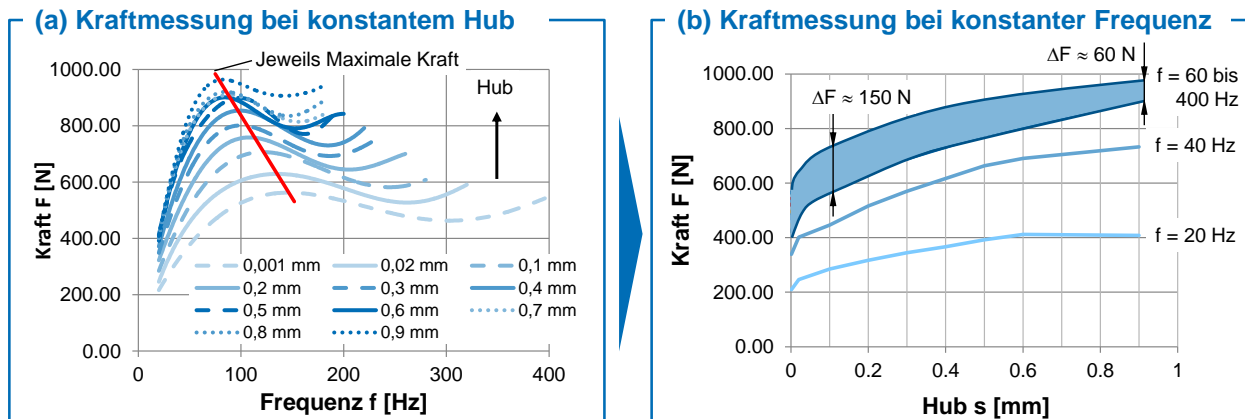


Abbildung 3: Auswertung der Kraftmessungen bei konstantem Hub (a) und konstanter Frequenz (b)

Die Messergebnisse in Abbildung 3 zeigen deutlich, dass eine Vergrößerung des Hubs mit einer betragsmäßigen Steigerung der Kraft einhergeht. Freier Hub und Kraft sind proportional. Die maximale Kraft wurde bei einem Hub von 0,9 mm gemessen. Für alle Klopf Frequenzen, die aufgrund zu geringer Oszillation keinen Werkstückkontakt bei 0,9 mm hatten, trat jeweils beim größten erreichten Hub die maximale Kraft auf. Die Veränderung des Kraftbetrages in Abhängigkeit der Frequenz ist nicht proportional (vgl. Abbildung 3 (a)). Bis 80 Hz steigt die Kraft streng monoton an. Das Kraftmaximum liegt bei 0,9 mm Hub bei 80 Hz. Wird mit kleineren Hubs geklopft, verschiebt sich der Ort des Maximums zu höheren Frequenzen. Zur besseren Übersicht wurden die Verläufe der Frequenzen 60 Hz bis 400 Hz in Abbildung 3 (b) zusammengefasst. Nur die Verläufe der Frequenzen 20 Hz und 40 Hz sind einzeln geplottet, da hier der Betrag der Kraft im Vergleich deutlich geringer ausfällt.

2.4 Zwischenfazit

Aus der Versuchsauswertung ergibt sich das Zwischenfazit, dass mit dem Festklopfen Schlagkräfte bis zu 1000 N erreicht werden können, wobei die Schlagkraft proportional zu dem zur Verfügung stehendem Hub bei der eingestellten Frequenz ist. Hinsichtlich einer Maximierung der Schlagkraft sind Frequenzen oberhalb 150 bis 200 Hz nicht zu empfehlen, zumal sich auch aufgrund des stark reduzierten Hubs hohe Anforderungen an die Positioniergenauigkeit ergeben.

3. Modellierung der Schlagkraft

Um die Vorgänge während des Klopfens beschreiben zu können, wird anhand des realen Klopfprozesses ein vereinfachtes Modell abstrahiert. Dazu wird der Gesamtprozess in Unterprozesse heruntergebrochen, die durch bekannte physikalische Gesetze beschrieben werden können. Beim elektro-dynamischen Festklopfsystem wird zuerst durch eine angelegte Spannung eine Erregerkraft erzeugt. Durch diese wird ein mechanisches Masse-Feder-Dämpfer-System in Schwingungen versetzt. Ist die Amplitude der Schwingung groß genug, kommt es zum elastisch-plastischen Kontakt zwischen Klopfkugel und Werkstück. Aus diesen Teilprozessen sind drei Subsysteme ableitbar, welche miteinander in Wechselwirkung stehen, vgl. Abbildung 4.

Elektrische Domäne

Die elektrische Domäne beschreibt die Modellierung der elektrischen Erregerkraft. Alle Komponenten sind in Abbildung 4 aufgeführt. Durch das Anlegen einer Eingangsspannung $u(t)$ an die Schwingspule entsteht in ihr ein Strom $i(t)$. Die Spule befindet sich im Magnetfeld eines Permanentmagneten, sodass auf sie eine Lorenzkraft wirkt. Die Lorenzkraft beschreibt das physikalische Phänomen, dass auf jeden stromdurchflossenen Leiter in einem Magnetfeld eine Kraft wirkt. Infolge dieser angreifenden Kraft wird das Schwingungssystem, bestehend aus Spule, Stößel und Klopfkugel, axial ausgelenkt.

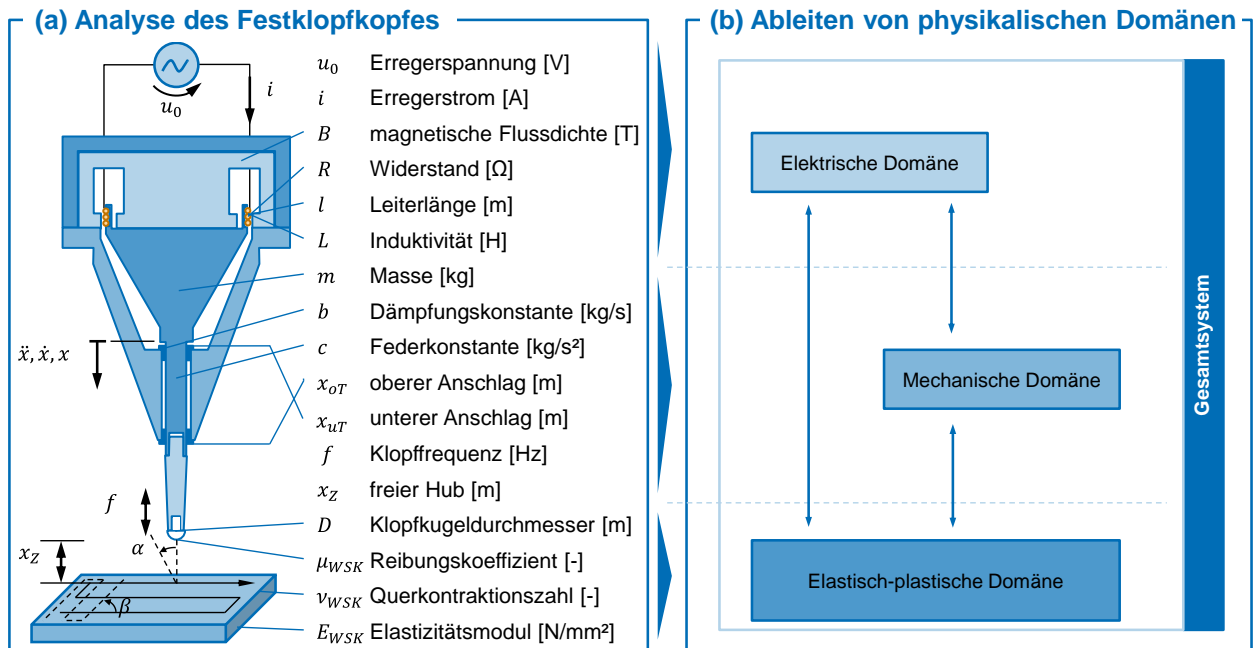


Abbildung 4: Analyse der Festklopfkopfprinzips und Ableitung von modellierbaren physikalischen Domänen

Durch die Auslenkung des Stößels im Magnetfeld wird eine Spannung $u_i(t)$ zurückinduziert, die entgegengesetzt der angelegten Spulenspannung $u(t)$ wirkt und die sogenannte Gegenlorenzskraft hervorruft. [GAIC11] Diese Zusammenhänge werden durch den folgenden Ausdruck wiedergegeben:

$$u(t) = \left(R + \frac{d}{dt} L \right) \cdot i(t) + Blv(t) , \quad (1)$$

wobei B die magnetische Flussdichte [T], L die Induktivität der Spule [H], l die Leiterlänge der Spule [m], v die Geschwindigkeit des Stößels [m/s] und R den elektrischen Widerstand [Ω] beschreiben. Unter der Voraussetzung, dass die Spule nur im homogenen Teil des Magnetfeldes bewegt wird

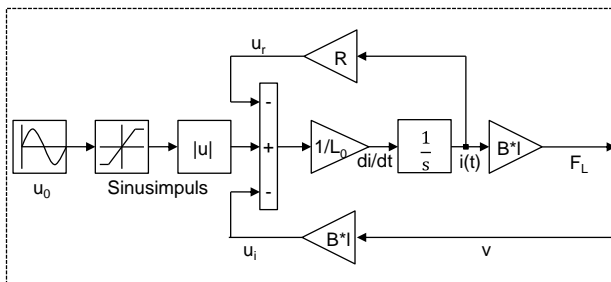


Abbildung 5: Wirkungsplan der elektrischen Domäne in MATLAB/Simulink

und, dass sich alle Ladungsteilchen senkrecht zu den magnetischen Feldlinien bewegen, gilt für die Lorenzkraft:

$$F_L = i(t)Bl. \quad (2)$$

In MATLAB/Simulink wurden die Gleichungen (1) und (2) durch den in Abbildung 5 gezeigten Wirkungsplan realisiert.

Mechanische Domäne

Als Grundlage zur Modellierung der Bewegungsgleichung des Klopfkopfes wurde ein Kräftegleichgewicht aufgestellt. Anregende Kraft ist die Lorenzkraft aus der elektrischen Domäne. Ihr entgegen wirken Reibungsvorgänge in den Lagern, die Rückstellkraft und die Trägheit der Schwingungsmasse. Das Aufstellen der Schwingungsgleichung ergibt Gleichung (3):

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + cx + F_{Vor} - F_{oA} + F_{uA} + F_K = F_L \quad (3)$$

wobei m die schwingende Masse [kg], b die Dämpfungskonstante [kg/s], c die Federkonstante [kg/s²], F_{Vor} die Vorspannung der Rückstellfeder, F_{oA} und F_{uA} die oberen bzw. unteren Anschläge und F_K die Schlagkraft sind, vgl. Abbildung 6.

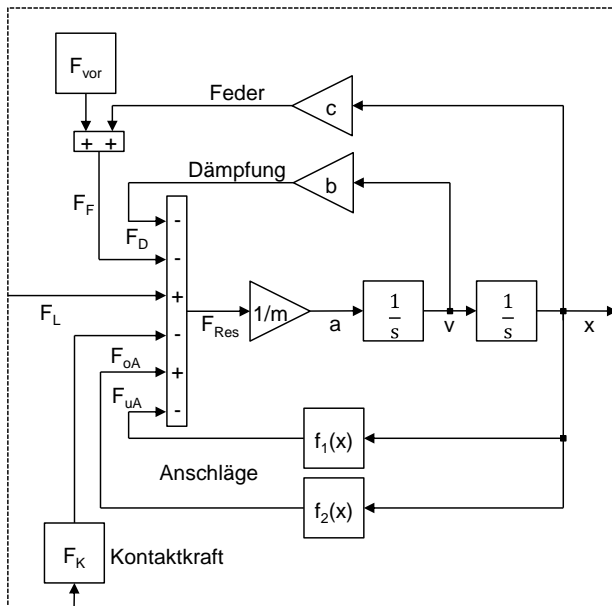


Abbildung 6: Wirkungsplan der mechanischen Domäne in MATLAB/Simulink

Elastisch-plastische Domäne

Bei dem Zusammenstoß zwischen Klopfkopf und Werkstück kommt es im Idealfall nur zu einer elastoplastischen Verformung des Werkstücks. Die Klopfkugel ist starr und bleibt unverformt. Die entstehende Kraft, die der Eindringung des Klopfkopfes in das Werkstück entgegenwirkt, hängt von den Klopffparametern und von den Materialeigenschaften

des Werkstücks ab. [TABO51, POPO09] Zur Bestimmung der Schlagkraft wird daher hier das elastisch-plastische Werkstoffverhalten durch die Materialformulierung zur Modellierung der Fließkurve nach Hollomon angenähert [HOLL45]. Aus experimentell ermittelten Daten wird hierdurch die Veränderung der Fließspannung in Abhängigkeit des Umformgrades abgebildet. Mithilfe der Theorie des Halbraums lässt sich nach Popov der Umformgrad als Funktion des Weges und Geometrie des Klopfkopfes abbilden [POPO09]:

$$\varphi(v) = \ln(\varepsilon + 1) = \ln\left(1 + \frac{x - x_z}{2\sqrt{D(x - x_z)}}\right), \quad (4)$$

wobei $x - x_z$ die Eindringtiefe [m] und D der Klopfkopfkugeldurchmesser [m] sind. Folglich ist es möglich, die resultierende Kontaktkraft aus der Kontaktfläche und der Fließspannung zu berechnen, vgl. Gleichung 5 [POPO09]:

$$F_6(\varphi, x) = p_m \cdot A_{proj} = 3\pi D(x - x_z) \cdot C \cdot \varphi^n, \quad (5)$$

wobei p_m der mittlere Kontaktdruck [MPa], A_{proj} die projizierte Kontaktfläche [m²] und C [MPa] sowie n [-] Hollomon-Konstanten zur Beschreibung des Materialverhaltens sind. Durch die Übergangsgrößen F_L , x und v werden die einzelnen Domänen zu einem Gesamtsystem verbunden.

3.2 Verifikation des Modells

Zunächst erfolgte die Verifikation des Modells anhand eines Vergleichs der Klopfbewegung. Sie ergibt sich aus der elektrodynamischen Schwingungsgleichung, welche die Grundlage des gesamten Wirkungsplans bildet. In der Simulation wurde mit einer gepulsten Gleichspannung gearbeitet, d.h. zur Krafterzeugung wurden nur die positiven Anteile der Sinusspannung verwendet. In Abbildung 8 (a) sind die normierte Erregerspannung u , die Geschwindigkeit v und der Weg x des Klopfkopfes aufgetragen. Das Klopfsystem folgt der Erregerfrequenz f mit einer kleinen Phasenverschiebung, welche auf Induktionseffekte zurückzuführen ist. Während eines Impulses überschreitet der Weg des Klopfkopfes mehrfach den freien Hub. Als Folge schlägt die Klopfkugel genauso häufig auf der Werkstückoberfläche ein. Der dazugehörige Kraftverlauf ist in Abbildung 8 (b)

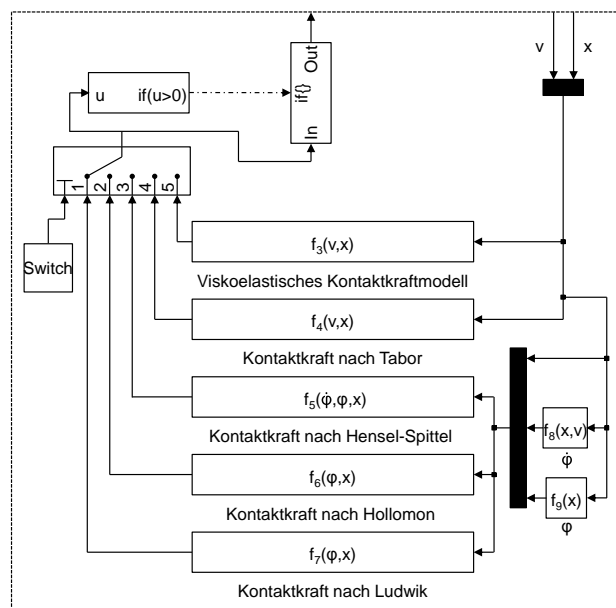


Abbildung 7: Wirkungsplan der elasto-plastischen Domäne in MATLAB/Simulink

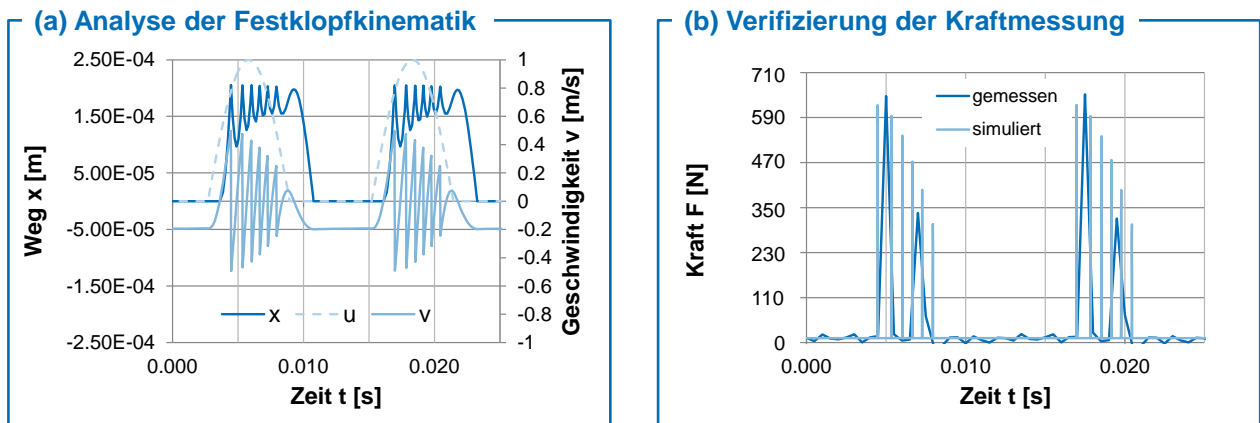


Abbildung 8: Der simulierte Weg und die simulierte Geschwindigkeit des Klopfkopfes bei einer Erregerfrequenz von 80 Hz und einem freien Hub von 0,2 mm (a) sowie der dazugehörige experimentelle und simulierte Kraftschrieb (b)

dargestellt. Das Phänomen, dass der Klopfkopf während eines Klopfzyklus mehrmals Werkstückkontakt hat, wird durch den gemessenen Kraftverlauf bestätigt. Aufgrund der sehr kurzen Kontaktzeit in Folge des harten Werkstücks federt der Klopfkopf von der Oberfläche zurück, bevor der Spannungsimpuls zu Ende ist. Bei tiefen Frequenzen ist die Intensität des Spannungsimpulses noch ausreichend, um den Klopfkopf erneut in Richtung des Werkstücks zu beschleunigen. Anhand von Abbildung 8 (b) ist ersichtlich, dass bei der Simulation der Klopfkopf in einer Periode wesentlich häufiger auf das Werkstück trifft als in der experimentellen Kraftmessung. Dies ist auf die experimentelle Messgenauigkeit zurückzuführen. Die Kontaktzeit der einzelnen Klopfkopfaufschläge ist geringer als die Abtastrate, sodass zwischen den abgebildeten Messpunkten weitere Ausschläge

versteckt sind. Im nächsten Schritt wurde der gemittelte Betrag der simulierten Schlagkraft mit dem aus den Klopfversuchen ermitteltem Betrag der Schlagkraft verglichen, vgl. Abbildung 9. Bei 80 Hz zeigt sich, dass die simulierten Kontaktkräfte bei einem kleinen Hub zu niedrig sind. Die Abweichung ist größer als 10%. Dies kann durch die Verwendung des einfachen Materialmodells nach Hollomon erklärt werden. Dieses berücksichtigt nicht den Einfluss der Umformgeschwindigkeit. Bei geringen Hübten variiert die erzeugte Einglättung stark mit der kinetischen Energie, sodass der Einfluss der Umformgeschwindigkeit hoch ist. Mit steigendem Hub verringert sich die Abweichung. Ab ca. 0,3 mm Hub stimmen die Simulationsergebnisse bis auf 10% mit den Messungen überein. Bei einem Hub von größer 0,45 mm ist die Abweichung für den Rest des Verlaufs kleiner als 5%.

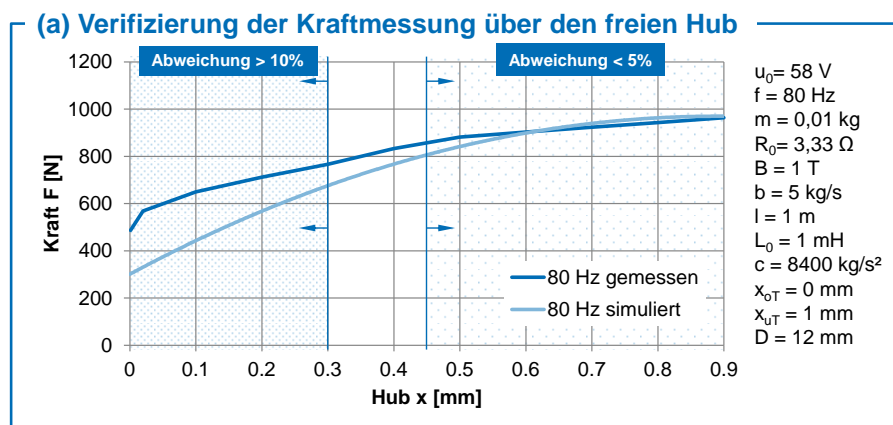


Abbildung 9: Verifizierung des Kraftverlaufs bei 80 Hz in Abhängigkeit des Hubs

Die kinetische Energie ist bei großen Hübten von gleicher Größenordnung, so dass hier der Einfluss der Umformgeschwindigkeit geringer ist, als bei kleinen Hübten.

Für einen Hub zwischen 0,6 mm und 0,9 mm stimmen die Verläufe bis auf eine Abweichung von max. 2% überein. Unter der Zielsetzung, die Schlagkraft in der industriellen Anwendung zu maximieren, spielen Hübe kleiner 0,6 mm keine wirtschaftliche Rolle, so dass das Modell für den Bereich zwischen 0,6 und 0,9 mm als hinreichend genau angesehen wird.

4. Zusammenfassung & Ausblick

Das Festklopfen ist ein umformtechnisches Fertigungsverfahren zur inkrementellen Oberflächenbehandlung von technischen Bauteilen. Obwohl das Festklopfen seit einiger Zeit bekannt ist, wurde es bisher unzureichend erforscht. Die für die Umformung signifikante Prozess- bzw. Schlagkraft ist als Ergebnis multiphysikalischer Randbedingungen nur schwer bestimmbar. In diesem Beitrag wurde zur Vorhersage der Schlagkraft ein elektrodynamisches Festklopfsystem in drei physikalische Domänen unterteilt, anschließend in der numerischen Simulationssoftware MATLAB/Simulink modelliert und diese Modelle anhand experimenteller Messungen verifiziert.

Die experimentellen Kraftmessungen zeigen, dass eine direkte Korrelation zwischen Hub und Schlagkraft besteht. Die maximale Schlagkraft wurde bei 80 Hz und 0,9 mm Hub zu ca. 1000 N bestimmt. Darüber hinaus wurde gezeigt, dass mit steigender Frequenz der Hub in der zweiten Potenz abnimmt, wodurch erhöhte Anforderungen an die Positioniergenauigkeit resultieren.

Mit dem entwickelten numerischen Modell unter Verwendung der Hollomonschen Beschreibung des plastischen Werkstoffverhaltens ist es gelungen, die Schlagkraft für Hübe zwischen 0,6 mm und 0,9 mm mit einer Abweichung kleiner 2% in dem untersuchten Versuchsraum abzubilden. In zukünftigen Arbeiten werden weitere Materialmodelle implementiert (z.B. die konstitutive Fließkur-

venformulierung nach Hensel und Spittel), so dass ebenfalls der Einfluss der Umformgeschwindigkeit und der Temperatur berücksichtigt werden kann.

Danksagung

Die Autoren danken Herren Alfons Ambros und Edmund Steiger der BMW AG sowie den Herren Christian Löcker und Peter Schenk der accurapuls GmbH für ihre Unterstützung während der Versuchsdurchführung.

Literatur

- [ABEL10] Abel, D.: Regelungstechnik. In: Aachener Forschungsgesellschaft Regelungstechnik: Umdruck zur Vorlesung Regelungstechnik. 34. Aufl. Aachen: Verlagsgruppe Mainz (2010)
- [BLE112] Bleicher, F.; Lechner, C. et al.: Mechanism of surface modification using machine hammer peening technology. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology (2012), Vol. 61, No. 1, S. 375–378.
- [HERI07] Hering, E., Martin, R., Stohrer, M.: Physik für Ingenieure. 10. Aufl. Berlin: Springer (2007)
- [HOLL45] Hollomon, J.H.: Tensile Deformation, Trans. AIME, (1945), 162, S. 258-290
- [GAIC11] Gaich, A.: Diskrete Lautsprechermodelle zur Simulation des Membranhubs und des Schalldrucks. BA. TU Graz (2011)
- [MADE06] Mader, S.: Festwalzen von Fan- und Verdichterschneideln. Diss. RWTH Aachen (2006)
- [POPO09] Popov, V.: Kontaktmechanik und Reibung. 1. Aufl. Berlin: Springer (2009)
- [RUST11] Rust, W.: Nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen. 2. Aufl. Wiesbaden, Vieweg+Teubner (2011)
- [TABO51] Tabor, D.: The Hardness of metals. 1. Aufl. London: Oxford University Press (1951)
- [WIED11] Wied, J.: Oberflächenbehandlung von Umformwerkzeugen durch Festklopfen. Diss. TU Darmstadt (2011)