

Zeitbereichsanalyse transienten Umformverhaltens zur Qualitätsbewertung beim Präzisionsschmieden von Hochleistungsbauteilen

Wilfried REIMCHE*, Vera BÖHM*, Friedrich-Wilhelm BACH*, Dirk ODENING**, Bernd-Arno BEHRENS**

* Institut für Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover

(An der Universität 2, 30823 Garbsen, Tel.: 0511 762 9861, Fax: 0511 762 9837)

** Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen, Leibniz Universität Hannover

(An der Universität 2, 30823 Garbsen, Tel.: 0511 762 2264, Fax: 0511 762 3007)

Kurzfassung. Die Körperschall-, Weg- und kontinuierliche Schallemissionsmesstechnik bieten unter Anwendung von Wavelet-Analysen neue Möglichkeiten sehr kurzzeitige transiente Ereignisse beim Präzisionsschmieden von Schmiedebauteilen, wie Zahnräder und Ritzelwellen, in einem weiten Frequenzbereich zu erfassen und zu analysieren. Mit Hilfe dieser Verfahren wurden die Stauch-, Fließ- und Reibvorgänge sowie die Formfüllung beim Präzisionsschmieden weg- und frequenzselektiv bewertet, um Schäden frühzeitig zu erkennen und den Schmiedeprozess empfindlich zu überwachen. Im Prozessablauf wurden Einflüsse der Temperatur, Schmierung und von Fremdkörpern auf das Umformverhalten und die Qualitätsmerkmale präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile erfasst und beurteilt. Aus der Analyse der Signalverläufe mit Hilfe von Wavelet-Transformationen einer Merkmals- und Vektoranalyse ergibt sich eine neuartige empfindliche Überwachungstechnik für transiente Fertigungsprozesse hinsichtlich der Schadensfrüherkennung sowie der Formfüllung und Qualitätsbewertung von Schmiedebauteilen.

1. Einleitung

Präzisionsschmieden ist ein umformtechnisches Fertigungsverfahren zur endkonturnahen Fertigung hochbeanspruchter Bauteile. Durch Sondermaßnahmen können Toleranzklassen bis IT 7 erreicht werden. Im Vergleich zu spanenden Fertigungsverfahren ist eine deutliche Verkürzung der Prozesskette und Verbesserung der Energie- und Materialeffizienz zu erreichen. Der hierzu initiierte Sonderforschungsbereich 489 „Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile“ hat sich die grundlegende Entwicklung und Qualifikation neuer technologischer und logistischer Verfahren zur Herstellung solcher Schmiedebauteile zum Ziel gesetzt. Die Ansprüche an Maß- und Formgenauigkeit beim Präzisionsschmieden stellen erhöhte Anforderungen an die Auslegung und Führung des Umformprozesses.

Aufbauend auf den Forschungsarbeiten im Teilprojekt B6 „Zerstörungsfreie Bauteilprüfung“ wurde basierend auf der Weg-, Körperschall- und Schallemissionstechnik eine Mess- und Analysetechnik zur Beurteilung von transienten Präzisionsschmiedevorgängen von verzahnten Schmiedebauteilen wie Zahnräder und Ritzelwellen entwickelt.



Um Informationen über den Prozessablauf des Umformvorgangs, die Beanspruchung und das Verschleißverhalten des Werkzeugs sowie die Bauteilqualität zu gewinnen, ist das Ober- und Unterwerkzeug mit Weg-, Körperschall- und Schallemissionsaufnehmern instrumentiert. Zielsetzung ist die Beurteilung von Einflussfaktoren wie der Temperatur, Schmierung und von Fremdkörpern auf das Umformverhalten und die Qualitätsmerkmale präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile im Prozessablauf. Im Verlauf des transienten Schmiedevorgangs liefert die Weginstrumentierung eine eindeutige Zuordnung der Prozessinformation zum Schmiedeweg. Die kontinuierliche Körperschall- und Schallemissionsmesstechnik bietet unter Anwendung von Wavelet-Analysen neue Möglichkeiten sehr kurzzeitige transiente Ereignisse beim Präzisionsschmieden in einem relevanten Prozessfenster, Zeit-Frequenzbereich zu erfassen und zu analysieren. Dieses ist ein Werkzeug zur frühzeitigen Schadenserkennung in hochbeanspruchten Bauteilen aber auch zur empfindlichen weg- und frequenzselektiven Überwachung und Bewertung der Fließ-, Reib- und Stauchvorgänge sowie von Schadensereignissen beim Präzisionsschmieden.

2. Weg-, Körperschall- und Schallemissionsmessungen zur frühzeitigen Schadensanalyse

Zur Überwachung des Lauf- und Betriebsverhaltens von industriellen Anlagen, wie Turbinen, Generatoren, Reaktoren Lüftern usw., finden insbesondere Körperschallmessungen als zerstörungsfreies Prüfverfahren eine breite Anwendung [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Neben einer frühzeitigen Fehler- bzw. Schadenserkennung werden Fertigungsprozesse sicherer gestaltet, um so die Produktivität und die Verfügbarkeit der Maschinen zu erhöhen, den Prozess zu optimieren und die Produktqualität zu verbessern.

Ohne in den laufenden Prozess einzugreifen, können mit Schallemissionsmessungen (AE) Schäden und ungünstige Betriebszustände der Anlagen nachgewiesen werden. Anwendungsbereiche sind die Überwachung von Undichtigkeiten bei Flüssigkeitsbehältern, die Rissinitiation und Rissbildung in Bauteilen während der Fertigung oder unter hohen Betriebsbeanspruchungen sowie der Nachweis von Bauteilschäden durch Korrosion [8, 9, 10, 11, 12]. Statistische Kennwerte (AE-Daten) ermöglichen ohne Kenntnis des Signalverlaufs relevante Signale von Störsignalen zu trennen und den aktuellen Zustand der Anlage zu beschreiben. Die wichtigsten Merkmale sind die Ankunftszeit, Maximalamplitude, Anstiegszeit, Signaldauer, Überschwinger eines Hits, Energie und Effektivwert [8].

Die Größe des Ausgangssignals des Körperschallaufnehmers ist der Schwingbeschleunigung proportional und sein Arbeitsbereich ist linear, unterhalb Resonanzfrequenz. Die Resonanzfrequenzen der kleinen Beschleunigungsaufnehmer mit geringer Masse liegen etwa bei 180 kHz und für die etwas größeren, allgemein gebräuchlichen Beschleunigungsaufnehmer sind Resonanzfrequenzen von 20 kHz bis 50 kHz typisch [13].

Schallemissionsaufnehmer arbeiten in ihren Resonanzbereichen und sind daher sehr empfindlich im Ultraschallbereich von ca. 20 kHz bis 2 MHz, um Schallemissionen, erzeugt durch Risse, Stöße, Korrosionsprozesse oder Wandern von Versetzungen, zu erfassen.

Zur differenzierten Betrachtung von relevanten transienten Prozessabläufen erfolgt die lückenlose Aufzeichnung der Körperschall- und Schallemissionssignale im gesamten Prozessfenster. Die aufgezeichneten transienten Zeitsignale der Beschleunigungs- und Schallemissionssensoren sind die Basis für die Wavelet-Analyse.

Im Fall kurzzeitiger transienter Prozesse, wo nicht nur die frequenzabhängige Signalintensität im betrachteten Zeitintervall im Vordergrund steht, sondern deren zeitabhängiges Verhalten oder wo aufgrund der Kurzzeitigkeit des auftretenden Ereignisses die Auflösung der FFT-Analyse nicht ausreicht, kommen sogenannte Wavelet-Analysen zum Ein-

satz [14]. Während man bei der Spektralanalyse mit festen Zeitfenstern rechnet, wird bei der Wavelet-Analyse der sogenannte Wavelet-Level eines Signals für verschieden große Zeitfenster bestimmt, in Abhängigkeit der in dem Signal enthaltenen Anregungen. Die Möglichkeit so in einem zeitlich begrenzten Interwall eine lokale Analyse der Frequenzkomponenten durchzuführen, ist der eigentliche Vorteil dieser Analysetechnik [6, 15, 16].

3. Präzisionsschmieden von Zahnrädern

Das Präzisionsschmieden der Zahnräder erfolgt in einer energiegesteuerten Spindelpresse SPR 500 der Firma Lasco. Um Informationen über den Prozessablauf sowie die Beanspruchung und das Verschleißverhalten im Hinblick auf eine Werkzeug- und Prozessoptimierung zu bekommen, ist der Einsatz von Weg-, Körperschall- und Schallemissionsmessungen während des Schmiedevorgangs vorgesehen (Abbildung 1).



Abbildung 1: Versuchsaufbau

Zur Erfassung der Körperschallsignale wird eine modulare Mess- und Steuerungskarte PCI-BASEII der Firma BMC Messsysteme GmbH verwendet. Die analogen Ein- / Ausgangsmodule mit einer Auflösung von 16 Bit ermöglichen Summenabtastraten von bis zu 1000 kHz (max. Abtastrate pro Modul 500 kHz). Als Software zur Auswertung der Körperschallsignale wird das Programm NextView®4 verwendet.

Als Beschleunigungssensoren kommen zwei Universalauftnehmer vom Typ Brüel & Kjaer (B&K) 4344 und 4371 zum Einsatz, die auf der Oberseite der Matrize mechanisch befestigt sind. Diese Sensortypen haben ein nahezu lineares Übertragungsverhalten in Frequenzbereichen von 0,1 bis 25 kHz ($\pm 10\%$) und von 0,1 bis 12,6 kHz ($\pm 10\%$). Die Beschleunigungsaufnehmer haben Resonanzfrequenzen im Frequenzbereich von 125 kHz und 42 kHz. Mit Hilfe eines Analogverstärkers mit integriertem Tiefpassfilter (125 kHz) werden die Signalpegel des verwendeten Sensors an die Eingangsstufe des verwendeten Datenerfassungs- und Datenanalysesystems angepasst.

Zur Erfassung und Analyse transientscher Schallemissionssignale dient das AE-System AMSY-5 der Firma Vallen Systeme GmbH mit den AE-Signalprozessoren vom Typ ASIPP.

Als Schallemissionsaufnehmer kommt der Sensor-Typ WSA der Firma Physical Acoustics Corporation zum Einsatz. Der AE-Sensor hat eine hohe Empfindlichkeit und ein breites Frequenzspektrum, was eine notwendige Eigenschaft für die Waveform-Analyse darstellt.

Voraussetzung für die Erfassung der spezifischen Prozessinformation und deren Klassifikation ist eine synchrone Aufzeichnung des Schallemissionssignals mit den Wegsignalen der Presse. Dazu werden das Ober- und Unterwerkzeug mit potentiometrischen Wegaufnehmern KL 1000 und KL 250 der Firma Contelec mit Messbereichen von 100 und 25 mm instrumentiert. Die einzelnen Ereignisse des Umformvorgangs, wie das Einfahren des Bolzen in das Rohteil und Gegenlager, Schließen des Werkzeugs, Einfedern des Werkzeugs lassen sich deutlich mit Hilfe der Wegsignale einzelnen Anregungen im Schallemissionssignal zuordnen. Neben maschinen- und werkzeuginduzierten Anregungen zeigen sich im Schallemissionssignal Reibanteile durch die Relativbewegung und Fließvorgänge des Rohlings in der Matrize (Abbildung 2.).

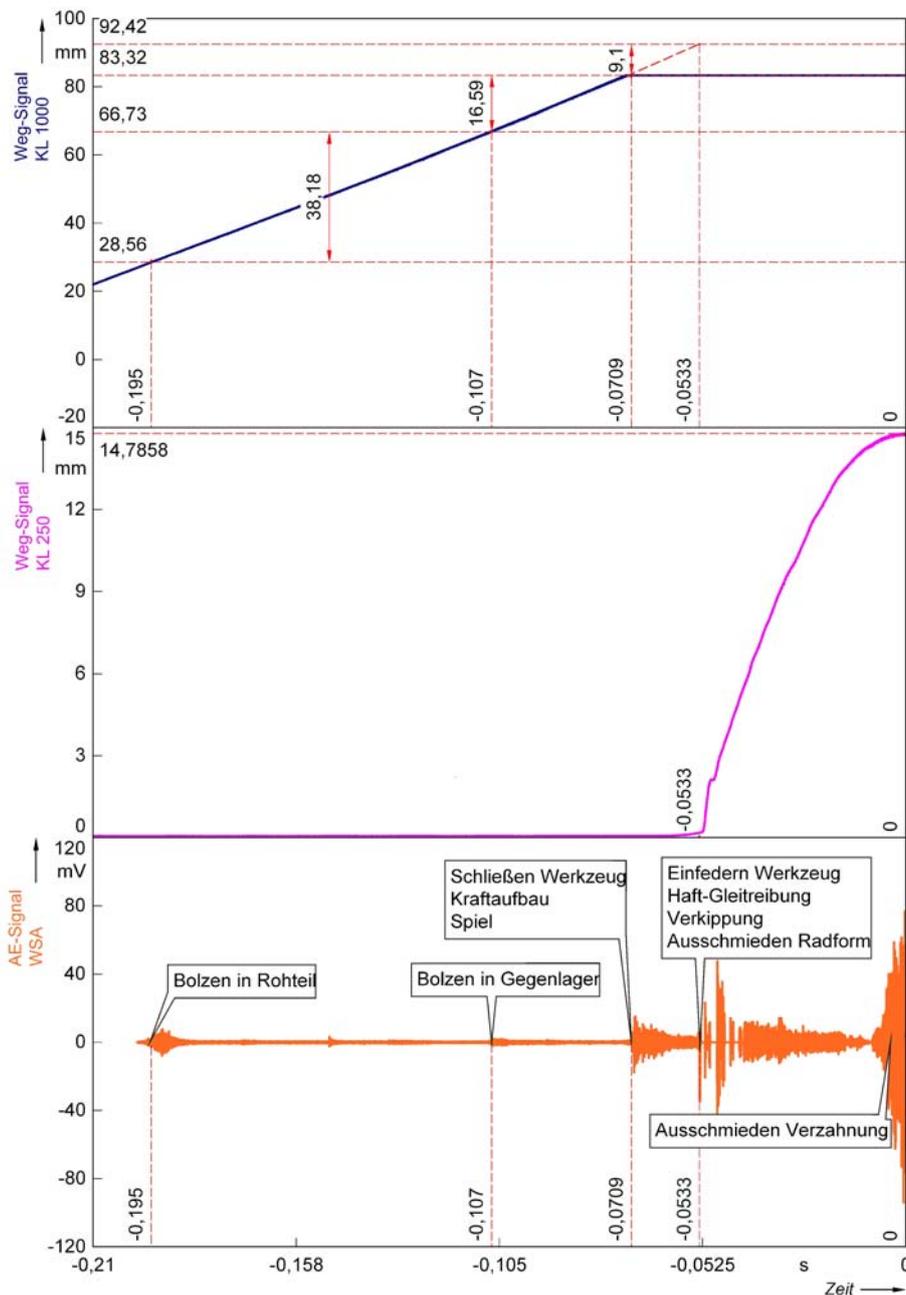


Abbildung 2: Wegabhängige Schallemissionen beim Präzisionsschmieden von Zahnrädern

4. Ergebnisse

Um den Reibungseinfluss auf den Umformprozess und die Bauteilqualität zu untersuchen, wurden Zahnräder bei verändertem Schmierstoffanteil geschmiedet (Abbildung 3).

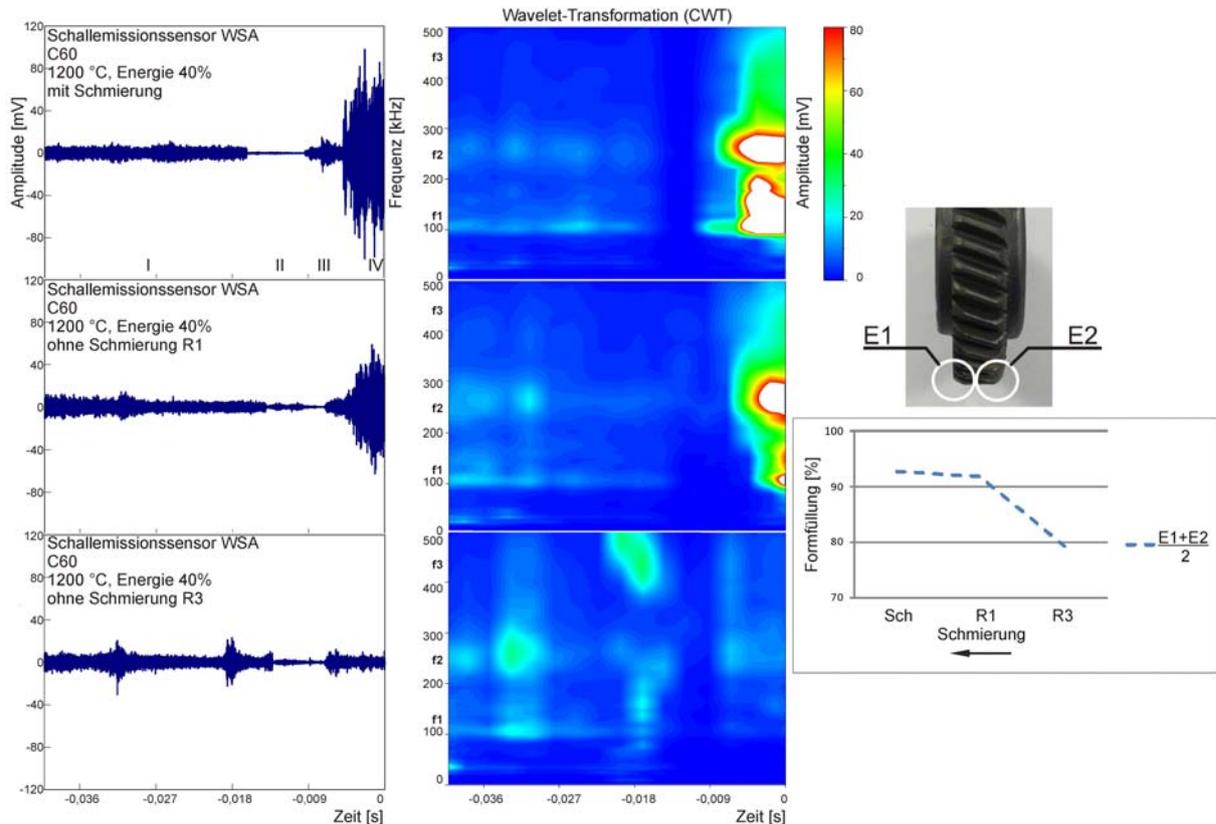


Abbildung 3: Reibungseinfluss – Schallemissionssignale beim Präzisionsschmieden von Zahnrädern:
oben – mit Schmierung;
mitte – ohne Schmierung 1. Zyklus;
unten – ohne Schmierung 3. Zyklus

In Abbildung 3 sind die Schallemissionssignale beim Präzisionsschmieden von Zahnrädern aus dem Werkstoff C60, bei einer Schmiedetemperatur von 1200 °C und einem Energieanteil von 40 % im Zeit- und Frequenzbereich bei Variation der Schmierung dargestellt. Die Signalverläufe sind in vier prozessrelevante Zeitabschnitte (Abbildung 3, oben, links) unterteilt: die Radformung I, den Kraftaufbau II, die Nabenformung III und Verzahnungsformung IV. Mit Hilfe der Wavelet-Transformation lassen sich transiente Signale gleichzeitig im Zeit- und Frequenzbereich betrachten. Den Diagrammen zufolge sind die Verluste der Nutzenergie ohne Schmierung im ersten und zweiten Zeitabschnitt größer, was zu einer schlechten Verzahnungsausformung im Zeitbereich IV mit größerer Zahnkantenverrundung führt. Bei der verwendeten Schallemissionsmesskette sind charakteristische Informationen im Frequenzbereich von 105 kHz, 260 kHz und 450 kHz dominant, die sich in Abhängigkeit des Umformverhaltens über dem Umformweg in signifikanten Intensitäten ausbilden.

Die Werkstücktemperatur bestimmt in besonderem Maße die Fließspannung und das Formänderungsvermögen. Zur Untersuchung des Einflusses der Schmiedetemperatur auf das Umformverhalten des Bauteils wird die Schmiedetemperatur von 1100 °C in Schrittweiten von 50 °C erhöht. Eine Erhöhung der Schmiedetemperatur führt zu signifikanten Veränderungen im Prozess- und Schallemissions-Signalverlauf über dem Umformweg, Abbildung 4. Infolge der höheren Fließspannung bei geringer Werkstücktemperatur

sind kontinuierliche Emissionen während der Bauteilformung und starke Emissionen während der Zahnformung zuerst im Frequenzbereich von 450 und 260 kHz und zunehmend im gesamten Spektralbereich ausgebildet.

Eine weitere Erhöhung der Schmiedetemperatur und als Folge ein verbessertes Fließverhalten führen zu einer weiteren Verbesserung der Formfüllung und sind durch die signifikante Ausbildung systematischer Frequenzbänder von 105 und 260 kHz im Bereich der Bauteilprägung charakterisiert.

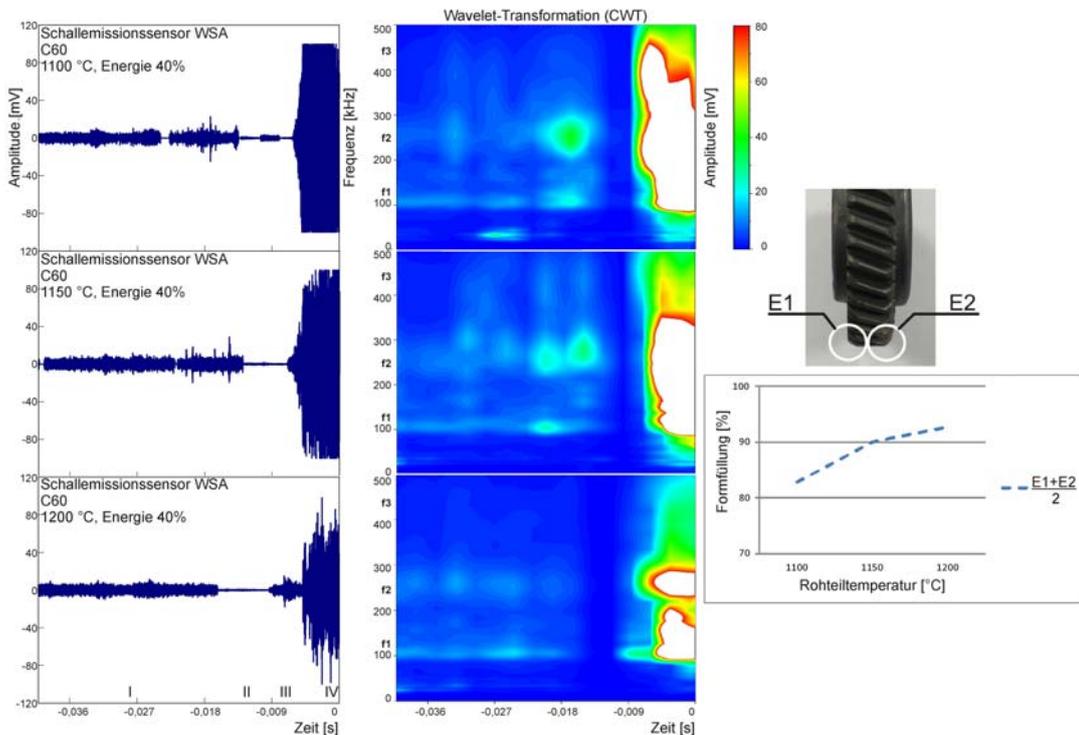


Abbildung 4: Temperatureinfluss

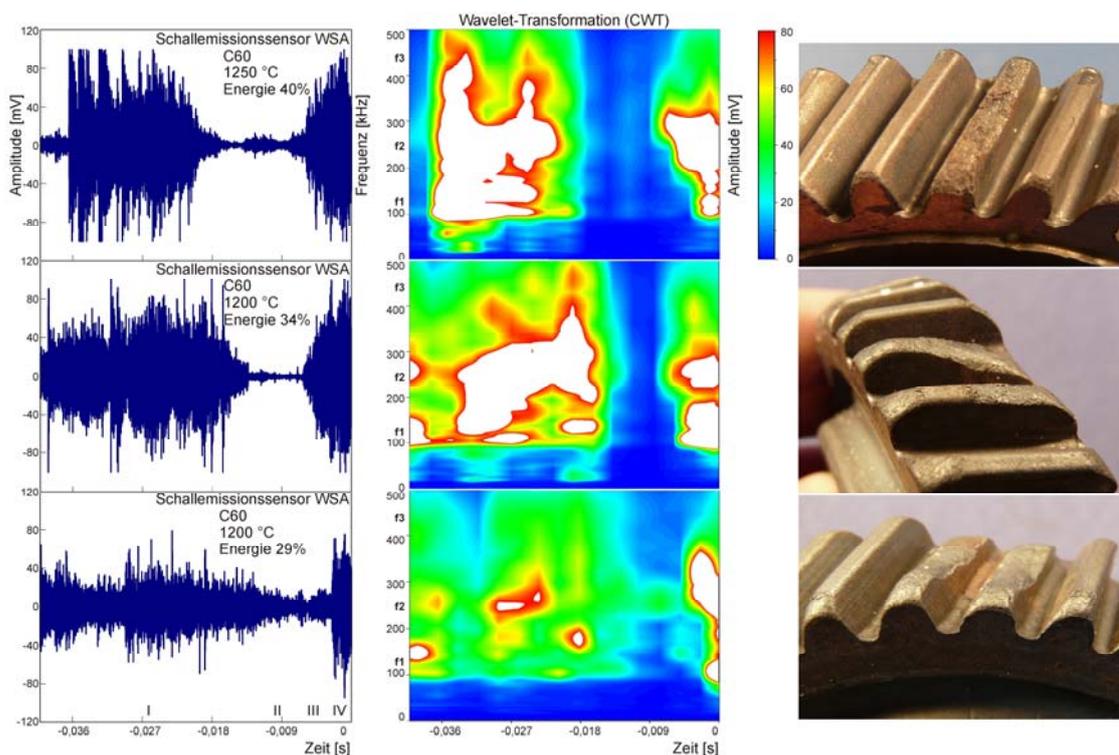


Abbildung 5: Fremdkörpereinfluss

Reststücke an Glühkohle aus dem Glühofen, die mit dem Rohling in das Schmiedewerkzeug gelangen, bewirken, dass das Bauteil lokal nicht vollständig ausgeformt wird, Abbildung 5. Unzureichende Gravurfüllungen durch das Werkstück sind unzulässige Schmiedefehler, die zu Ausschussteilen führen. Ein Zerbrechen von Glühkohlestücken im Werkzeug führt zu stark erhöhten Schallemissions- und Körperschallsignalen während der Umformung in einem weiten Frequenzbereich, die sich deutlich von dem Signalverlauf bei einem normalen Prozessablauf abheben. Auch hier bietet die Körperschall- und Schallemissionsanalyse Möglichkeiten, Unregelmäßigkeiten im Prozessablauf frühzeitig zu erkennen.

5. Merkmalsextraktion, Klassifizierung und Bauteil-Qualitätsbewertung

Um die Signifikanz in den Körperschall- und Schallemissionssignalen über charakteristische Merkmale zur Prozessüberwachung und Bauteil Klassifizierung zu nutzen, werden die Signalverläufe aus den Wavelet-Transformationen bei charakteristischen Frequenzen analysiert. Als charakteristische Frequenzen, die signifikante Informationen über den Schmiedeprozess, die Formfüllung und Prozessstörungen beinhalten, werden im Körperschallbereich die Frequenzbänder von 30 kHz, 72 kHz und 116 kHz sowie im Schallemissionsbereich von 105 kHz, 260 kHz und 450 kHz betrachtet. Die bei den genannten Frequenzen und in den Zeitabschnitten I..IV über dem Umformweg berechneten Effektiv- und Spitzenwerte sind im Bezug zu den Werten beim Schmieden von Referenz-Gutteilen normiert.

Als Referenz-Gutteile werden fehlerfreie Schmiedeteile mit einer Formfüllung von über 90 % betrachtet und der Mittelwert für jeden Sensor und Frequenzband in den vier Zeitabschnitten bestimmt. Die Einzelmesswerte liegen dabei in einem Toleranzband von $< \pm 50\%$ um den Mittelwert. Um Unregelmäßigkeiten im Prozessablauf frühzeitig messtechnisch zu erkennen, sollte bei einer vektoriellen Betrachtung aller drei Frequenzen die relative Abweichung um den vektoriellen Referenzwert für jeden Sensor in den vier Zeitabschnitten kleiner 1,8 sein.

Beim Präzisionsschmieden von Hochleistungsbauteilen ist hinsichtlich der Bauteilqualität die Formfüllung und insbesondere die Ausformung der Zähne ein wesentliches Qualitätsmerkmal. In Abhängigkeit der Prozessparameter und Materialeigenschaften sowie deren Einfluss auf den Umformprozess zeigen die Zahnräder aus dem Kohlenstoffstahl C60 bei einer Schmiedetemperatur von 1200 °C und einem Energieanteil von 40 % die beste Ausformung der Zähne.

Die Bauteile die unter Variation der Prozessparameter und die Bauteile die unter Prozessstörungen durch Materialverwechslung, anhaftende Glühkohle oder Ausfall der Schmierung geschmiedet werden, sind in zwei Gruppen einzuteilen, Abbildung 6.

In der ersten Gruppe ist der Einfluss der Prozessparameter, wie Schmiedetemperatur und Energieanteil, auf die Bauteilqualität ersichtlich. Damit ergeben sich neue Möglichkeiten der online Überwachung zur frühzeitigen Erkennung von Unregelmäßigkeiten und Regelung von Schmiedeprozessen. Die zweite Gruppe umfasst neue Wege zur inline Fehlererkennung, Fehlerklassifizierung und Qualitätsbewertung der Bauteil in der Fertigung.

6. Zusammenfassung

Aufbauend auf diesen Forschungsergebnissen bieten die Weg-, Körperschall-, Schallemissionsmesstechnik und die Wavelet-Analyse neue Ansätze, sehr kurzzeitige transiente Vorgänge beim Präzisionsschmieden messtechnisch zu erfassen, zu analysieren und zu beurteilen. Damit ergeben sich neue Möglichkeiten zur empfindlichen Überwachung von transienten Fertigungsprozessen sowie der Schadensfrüherkennung und Qualitätsbewertung von Bauteilen.

Danksagung

Unser Dank gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung dieses Projektes im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 489 „Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile“

Referenzen

- [1] Schuster, A.: Automatische Prozeßüberwachung sichert Teilequalität beim Stanzen. Maschinenmarkt, Würzburg, Bd. 104, Heft 39, 1998, s. 26-29
- [2] Kopka, T.; Schwer, A.: Strukturierte Prozessüberwachung erfasst Störverhalten von Werkzeugen. Maschinenmarkt, Würzburg, Bd. 106, Heft 4, 2000, s. 22-25
- [3] Südmersen, U.; Scheer, Ch.; Pietsch, O.; Reimche, W.; Bach, Fr.-W.: Failure Source Localization at Turbo-Sets by Combined Vibration and Process Parameter Analysis. The 9th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Honolulu, Hawaii, February 10-14, 2002
- [4] Südmersen, U.; Pietsch, O.; Scheer, Ch.; Reimche, W.; Bach, Fr.-W.: Condition Monitoring by Vibration Analysis in Power Plants and Production Lines. JSME Annual Meeting 2002, International Symposium on Machine Condition Monitoring and Diagnosis, Tokyo, Japan, 25th-26th September 2002
- [5] Hartleben, B.: Erfahrungsbericht über Schadensfrüherkennung und Überwachung durch Körperschallanalyse in Kraftwerksanlagen. VGB Kraftwerkstechnik 74 (1994), Heft 9, s.783-786
- [6] Pietsch, O.; Scheer, C.; Südmersen, U.; Reimche, W.; Bach, Fr.-W.: Zustandsbeurteilung von Schmiedehämmern durch Schwingungsanalysen. VDI-EKV Tagung „Schwingungen in Verarbeitungsmaschinen“, Leonberg, 2005
- [7] Reimche, W.; Bach, Fr.-W.: Schädigungsfrüherkennung mittels Körperschallanalysen zur Verfügbarkeitssicherung industrieller Anlagen. DFG-Abschlußbericht Ba851/40-1, Hannover, September, 2004
- [8] Vallen, H.: Die Schallemissionsprüfung. Castell-Verlag, Wuppertal 2003, ISBN 3-934 255-08-6
- [9] Miller, R.; Hill, E: Non-Destructive Testing Handbook, Acoustic Emission Testing, Vol. 6, ASNT, 2005
- [10] Ono, K.: New goals for acoustic emission in material research. Keynote lecture, in Acoustic Emission beyond the Millennium, Tokyo, Japan, 11-14 September 2000
- [11] Richeton, T.; Weiss, J.; Louchet, F.: Breakdown of avalanche critical behavior in polycrystalline plasticity. Nature Materials, Vol. 4, 2005, 465-469
- [12] Grosse Ch. U; Ohtsu M.: Acoustic Emission Testing. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008, ISBN 978-3-540-69895-1
- [13] N.N.: Schwingungsmessung. Brüel&Kjaer, 1986
- [14] Wang, W. J.: Wavelets for detecting mechanical faults with high sensitivity. Mechanical Systems and Signal Processing 15(4), 2001, 685-696, ISSN 08883270
- [15] Takemoto, M.; Nishino, H.; Ono, K.: Wavelet Transform – Applications to AE Signal Analysis, Acoustic Emission. Beyond the Millenium, Elsevier, 2000
- [16] Misiti, M.; Misiti, Y.; Oppenheim, G.; Poggi J.-M.: Wavelet Toolbox User’s Guide. The MathWorks, Inc. 1997-2000