

Körperschall- und schallemissionsbasierte Diagnosetechnik zur Beurteilung von transienten Präzisionsschmiedevorgängen

Vera BÖHM¹, Wilfried REIMCHE¹, Hans Jürgen MAIER¹, Dirk ODENING², Bernd-
Arno BEHRENS²

¹ Institut für Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover

(An der Universität 2, 30823 Garbsen, Tel.: 0511 762 18313, Fax: 0511 762 9837)

² Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen, Leibniz Universität Hannover
(An der Universität 2, 30823 Garbsen, Tel.: 0511 762 2264, Fax: 0511 762 3007)

Kurzfassung. Die Fertigung von Hochleistungsbauteilen in einer verkürzten Prozesskette Präzisionsschmieden, wie es sich der Sonderforschungsbereich 489 zum Ziel gesetzt hat, erfordert die Entwicklung einer verfahrensbegleitenden Überwachung der einzelnen Prozessschritte. Eine qualitätsgesicherte, verkürzte Fertigung ist nur durch eine in der Fertigungskette integrierte zerstörungsfreie Bauteilprüfung hinsichtlich der mechanisch-technologischen Bauteileigenschaften und Bauteilfehler möglich. Das Präzisionsschmieden, als endkonturnahes Fertigungsverfahren für Bauteile, hebt sich durch die hohe Maß- und Formgenauigkeit hervor. Die vielfältige Funktionalität der hoch beanspruchten Werkzeuge und die Vielzahl der Einflussgrößen machen es erforderlich Informationen über das Verhalten der Schmiedepresse und den Verlauf des Umformprozesses, sowie die Beanspruchung des Werkstücks und das Verschleißverhalten des Werkzeugs im Prozessablauf zu erhalten, um Informationen über die Bauteilqualität zu gewinnen.

Die kontinuierlichen, wegbezogenen Körperschall- und Schallemissionsmesstechniken bieten unter Anwendung von Wavelet-Analysen neue Möglichkeiten, sehr kurzzeitige transiente Ereignisse beim Präzisionsschmieden von Hochleistungsschmiedebauteilen, wie Zahnräder und Ritzelwellen, in einem weiten Frequenzbereich des Körperschalls und der Schallemissionen zu erfassen und zu analysieren. Der Schmiedeprozess wird durch zahlreiche Parameter, wie z.B. Schmierungsanteil, Presseneinstellungen und Kinematik der Presse und Festigkeit des Schmiedeteils beeinflusst. Veränderungen dieser Größen werden durch eine charakteristische Ausbildung systematischer Frequenzbänder während bestimmter prozessrelevanter Zeitabschnitte in den Signalverläufen erkennbar. Aus der Analyse der Signalverläufe mit Hilfe von Wavelet-Transformationen im Zeit-Frequenzbereich in relevanten, wegbezogenen Prozessfenstern ergibt sich eine neuartige, empfindliche online Überwachungstechnik für transiente Fertigungsprozesse hinsichtlich der Schadensfrüherkennung sowie der Qualitätsbewertung von Schmiedebauteilen.

1. Einleitung

Präzisionsschmieden ist ein umformtechnisches Fertigungsverfahren zur endkonturnahen Fertigung hochbeanspruchter Bauteile. Durch Sondermaßnahmen können Toleranzklassen bis IT 7 erreicht werden. 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“ des Sonderforschungsbereichs 489 „Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile“ 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 zu gewinnen, wurde das Ober- und Unterwerkzeug einer Schmiedepresse mit Weg-, Körperschall- und Schallemissionsaufnehmern instrumentiert. Die Einflussfaktoren, wie die Prozesseinstellungen und Kinematik der Presse, die Schmierung, der Werkstoff, auf das Umformverhalten und die Qualitätsmerkmale präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile sollten im Prozessablauf beurteilt werden. Im Verlauf des transienten Schmiedevorgangs soll die Weginstrumentierung eine eindeutige Zuordnung der Prozessinformation zum Schmiedeweg liefern. Die kontinuierliche Schallemissionsmesstechnik (AE) bietet hierbei unter Anwendung von Wavelet-Analysen neue Möglichkeiten, sehr kurzzeitige transiente Ereignisse beim Präzisionsschmieden in einem relevanten Prozessfenster zu erfassen und zu analysieren [1], [2].

2. Präzisionsschmieden von schrägverzahnten Zahnrädern

Das Präzisionsschmieden der Zahnräder erfolgte in einer energiegesteuerten Spindelpresse SPR 500 der Firma Lasco.

Die verwendete Presse gehört zu den arbeitsgebundenen (energiegebundenen) Schmiedepressen. Arbeitsgebundene Schmiedepressen bieten einen bestimmten Betrag an Arbeitsvermögen an, der bei jedem Hub vollständig umgesetzt wird. Ein auf einer arbeitsgebundenen Presse durchgeführter Vorgang kommt zum Stillstand, sobald das Arbeitsvermögen der Maschine erschöpft ist [3]. Konstruktionsbedingt gibt es bei Spindelpressen keinen kinematisch fixierten unteren Totpunkt und kein Blockieren unter Last. Beim Auftreffen auf das Werkstück wird die gesamte kinetische Energie in Umform- und Verlustarbeit umgesetzt. Der Schlagwirkungsgrad wird durch Längsfederverluste und Torsionsfederverluste der Spindel sowie Reibverluste bestimmt.

Beim Schmieden von Rohrhalfzeugen ($\varnothing_{\text{außen}} = 64 \text{ mm}$; $\varnothing_{\text{innen}} = 34 \text{ mm}$; $h = 30 \text{ mm}$) wurde das Rohteil in einem mit Glühkohle gefüllten Wärmeschutzbehälter auf die erforderliche Schmiedetemperatur erwärmt und die Umformung erfolgte in einem einstufigen Prozess mit Hilfe eines Werkzeugsystems für das Präzisionsschmieden schrägverzahnter Zahnräder. Das verwendete Werkzeugsystem ist modular aufgebaut und besteht neben der schwimmend auf Tellerfedern gelagerten Matrize im Wesentlichen aus einem Oberstempel und einem Unterstempel. Das Aufbauprinzip ist in Abb. 1 dargestellt.

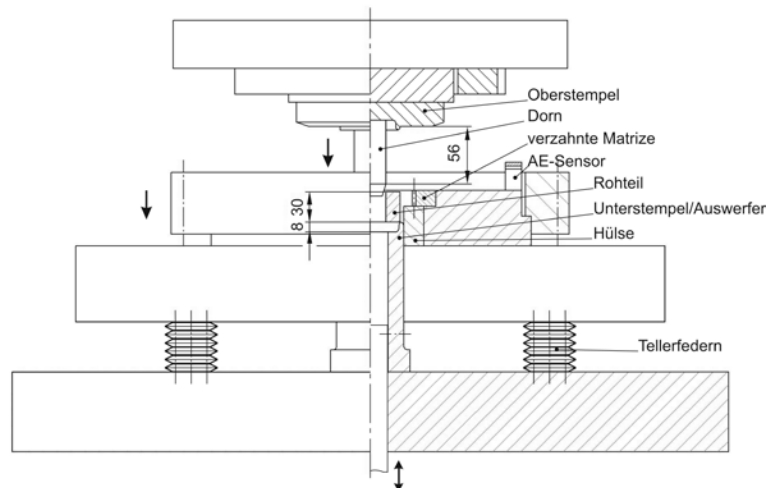


Abb. 1: Werkzeugsystem für das Präzisionsschmieden von schrägverzahnten Zahnrädern [2]

2.1 Werkzeuginstrumentierung, Signalerfassung und Signalanalyse

Um Informationen über den Prozessablauf zu bekommen, wurde das Präzisionsschmiedewerkzeugsystem mit Körperschall- und Schallemissionsaufnehmern sowie Wegsensoren instrumentiert. Schallemissions- und Körperschallmessungen wurden während des Schmiedevorgangs durchgeführt, Abb. 2.



Abb. 2: Lasco Spindelpresse mit Werkzeugsystem für schrägverzahnte Zahnräder sowie Werkzeuginstrumentierung [1], [4]

Als Beschleunigungssensoren kamen zwei Universalaufnehmer vom Typ Brüel&Kjaer (B&K) 4344 und 4371 in Kombination mit dem Ladungs-Strom-Wandler B&K 2646 zum Einsatz, die auf der Oberseite der Matrize mechanisch befestigt wurden, Abb. 2, rechts. Diese Sensortypen B&K 4344 und B&K 4371 haben ein nahezu lineares Übertragungsverhalten von $\pm 10\%$ in den Frequenzbereichen von 0,1 bis 25 kHz und von 0,1 bis 12,6 kHz sowie Resonanzfrequenzen im Frequenzbereich von 125 kHz und 42 kHz. Mit Hilfe eines Analogverstärkers mit integriertem Tiefpassfilter (125 kHz) wurden die Signalpegel des verwendeten Sensors an die Eingangsstufe des verwendeten Datenerfassungs- und Datenanalysesystems angepasst [1], [4].

Als Schallemissionsaufnehmer kam der Sensor-Typ WSA der Firma Physical Acoustics Corporation in Kombination mit dem AE-Vorverstärker AEP4 der Firma Vallen

Systeme GmbH zum Einsatz. Der AE-Sensor hat eine hohe Empfindlichkeit und ein breites Frequenzspektrum, was eine notwendige Voraussetzung für die Waveform-Analyse darstellt [1], [4].

Für die Erfassung der spezifischen Prozessinformation und deren Klassifikation ist die synchrone Aufzeichnung des Schallemissionssignals mit den Wegsignalen der Spindelpresse erforderlich. Da die Matrize bei dem eingesetzten Werkzeug beweglich auf Federn gelagert ist und während der Umformung nach unten fährt, wird neben dem Stößelweg auch der Matrizenweg erfasst. Daher wurden das Ober- und Unterwerkzeug mit potentiometrischen Wegaufnehmern KL 1000 und KL 250 der Firma Contelec mit Messbereichen von 100 und 25 mm instrumentiert.

2.2 Definition prozessrelevanter Zeitabschnitte in Schallemissionssignalen beim Präzisionsschmieden von Zahnrädern

Bedingt durch den Aufbau des geschlossenen Werkzeugsystems zum Präzisionsschmieden von schrägverzahnten Zahnrädern (Abb. 1) setzt der Oberstempel zum Beginn des Arbeitshubes auf die auf Tellerfedern gelagerte Matrize auf. Nachdem die Kräfte aufgebaut worden sind, werden die Federn gestaucht. Kurz danach beginnt die eigentliche Umformung des Zahnrades.

Das Werkzeug beim Präzisionsschmieden der Zahnräder erzwingt einen ganz bestimmten Werkstofffluss und zwar in Bewegungsrichtung der Werkzeugteile und quer dazu. Alle diese Übergänge sind fließend. Zur Definition der Vorgangsgrenzen wird daher im Folgenden der Einfluss des Zustandes des Zahnradgrundkörpers auf die Informationsänderungen in transienten Schallemissionssignalen mit Hilfe der berechneten RMS-Werte und mittels Peak-Hold Kurzzeit-Fourier Transformation-Spektren (Peak-Hold STFT) dargestellt.

Die Peak-Hold STFT erzeugt eine 3D Zeit-Frequenz-Raumkurve aus den FFT von sich überlappenden Datensegmenten. Aus jedem berechneten Spektrum wird nur der höchste Spektralwert mit der ihm zugeordneten Frequenz und Zeit in das Ergebnis übernommen.

Bei der Umformung des Rohteils im geschlossenen Gesenk sind mehrere Stadien zu betrachten. Die Umformung durch das Stauchen und Anlegen des Rohteils zwischen Ober- und Unterstempel wird als Radformung - Zeitabschnitt I bezeichnet, (Abb. 3). Die Ringnut als zusätzliches Formelement hat zur Folge, dass sich der Fließweg verlängert und es am Ende des Umformvorgangs zu einer Verengung zwischen Ober- und Unterstempel kommt, der den Werkstofffluss behindert. Dieser Zeitabschnitt II ist im Schallemissionssignalverlauf durch einen Intensitätsabfall gekennzeichnet, bedingt durch den Kraftaufbau und Einschränkung des Werkstoffflusses und lässt sich mit Hilfe der RMS-Werteverläufe deutlich definieren.

Der im Folgenden durch den sich ergebenden kleineren Querschnitt unter erhöhten Kräften fließende Werkstoff führt zu einer Verstärkung der Amplitude im Schallemissionssignal. Dieser Zeitpunkt wird als Anfang des nächsten Vorgangs, der Zahnkranzformung – Zeitabschnitt III, definiert. Sein Ende ist durch Spitzenwerte in der Peak-Hold STFT, im Frequenzbereich oberhalb von 260 kHz gekennzeichnet.

Der Zeitabschnitt IV- die Verzahnungsformung, ist durch sehr hohe Schallemissionssignalleistungen über dem Umformweg im Frequenzbereich von 100 bis 260 kHz charakterisiert. Der steile Anstieg der RMS-Amplitude gegen Ende der Umformung wird vor allem durch den Widerstand beim Ausfüllen der Verzahnform, Kantengeometrie und die Wirkung des sich verengenden Zahnspalts hervorgerufen. Hierbei vergrößert sich die Oberfläche des Bauteils, was neben einer erhöhten Reibung, eine hohe

Wärmeabfuhr aus dem Schmiedeteil in das Gesenk bewirkt und damit zu einer Zunahme der Fließspannung führt [2].

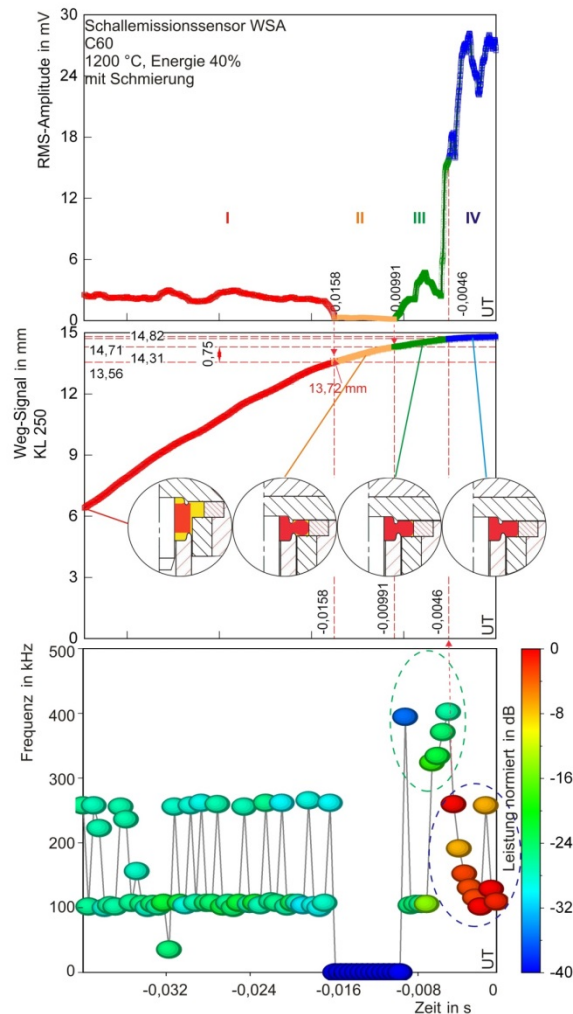


Abb. 3: Definition der Vorgangsgrenzen in Schallemissionssignalen mit Hilfe der RMS, Peak-Hold STFT und Weg-Verläufen beim Präzisionsschmieden von Zahnrädern [2]

2.3 Reibungseinfluss

Bei der Umformung metallischer Werkstoffe ist die Aufgabe der Schmierung, die Reibungsverluste und damit den Kraft- und Energiebedarf des Umformvorgangs zu vermindern und so die Umformbarkeit des Werkstückstoffs besser auszunutzen sowie den Verfahrensablauf zu optimieren. Durch die Reduzierung der Schmierung (Graphit-Spray) wurde der Einfluss der Reibung auf den Umformvorgang und auf das Umformergebnis mit erfasst.

Die präzisionsgeschmiedeten Verzahnungen wurden mit einem Schleifaufmaß auf den Zahnflanken gefertigt. Als umformspezifisches Qualitätsmerkmal wurde die Ausformung der Verzahnung in axialer Richtung beurteilt. Beim radialen Fließprozess und Umformen der Zahnräder in der Matrice kann es zur unvollständigen Formfüllung kommen [5]. Als Kenngröße für die Formfüllung wurde die Fläche unter dem Zahnprofil, das im Längsschnitt im Bereich der Zahnkantenverrundung gemessen wurde, bezogen auf die Fläche des vollständig ausgeformten Zahnes im Längsschnitt, ermittelt.

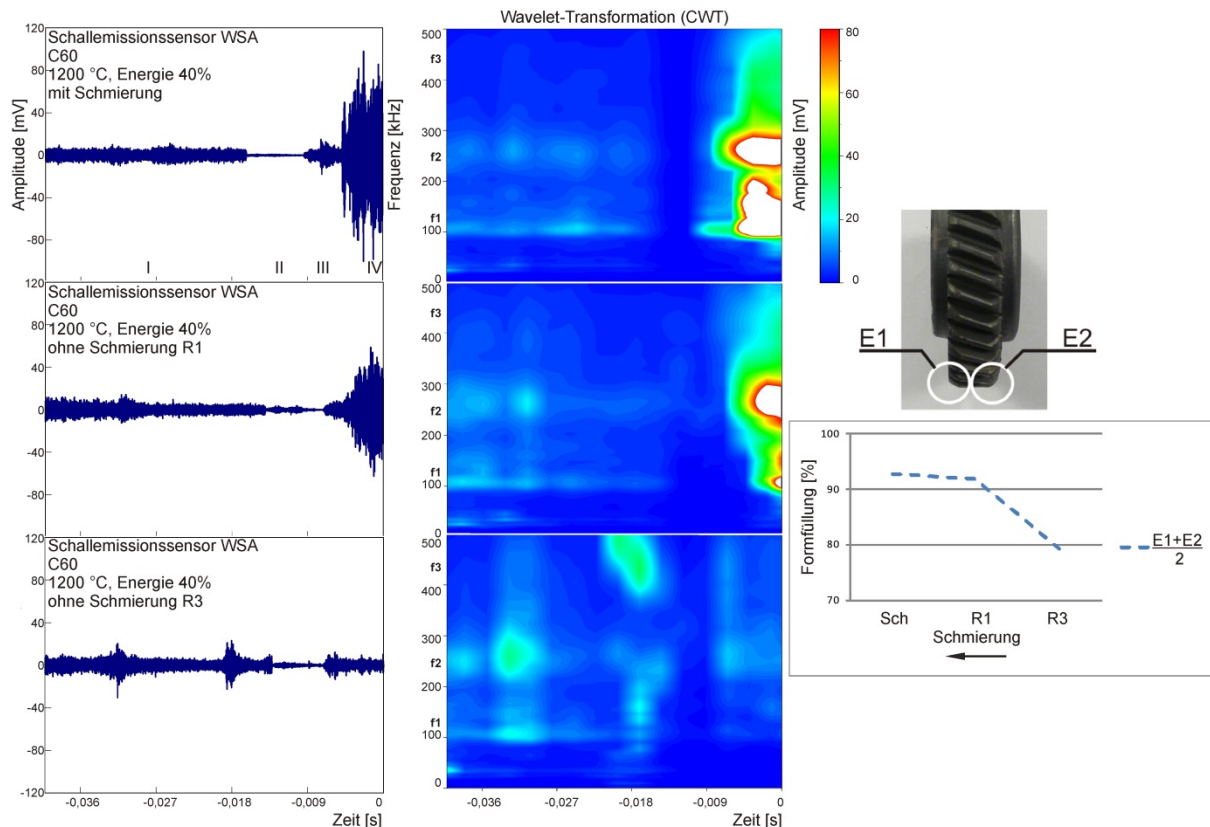


Abb. 4: Reibungseinfluss – Schallemissionssignale beim Präzisionsschmieden von Zahnrädern:
oben – mit Schmierung,
mitte – ohne Schmierung 1. Zyklus,
unten – ohne Schmierung 3. Zyklus [1], [4]

In Abb. 4 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 unter Variation der Schmierung dargestellt.

Wie zuvor beschrieben, sind die Signalverläufe in vier prozessrelevante Zeitabschnitte (Abb. 4, oben, links) unterteilt:

- die Radformung I,
- den Kraftaufbau II,
- die Zahnkranzformung III und
- die Verzahnungsformung IV.

Mit Hilfe der Wavelet-Transformation lassen sich transiente Signale gleichzeitig im Zeit- und Frequenzbereich betrachten. Durch die höheren Reibungsverluste in den Zeitabschnitten I und II wird der Nutzarbeitsanteil der Umformarbeit reduziert. In deren Folge führen geringere Innendrucke zu einer geringeren Auffederung der Matrize und zu einer schlechteren Ausformung des Zahnradgrundkörpers sowie der Verzahnung. Wie in Abb. 4 zu erkennen ist, nimmt die Intensität in Zeitabschnitten III und IV der Verzahnungsformung bei größeren Reibungsverlusten ab.

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 Signalintensitäten ausbilden [1], [4].

3 Präzisionsschmieden von Ritzelwellen

Um das Bauteilspektrum gezielt zu erweitern, wurde als Beispiel für ein Langteil mit axial ausgeprägter Massenverteilung zusätzlich das Präzisionsschmieden einer Ritzelwelle betrachtet. Grundlagenuntersuchungen zum Präzisionsschmieden der Ritzelwellen sind am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen der Leibniz Universität Hannover (IFUM) auf einer Schmiedekurbelpresse der Fa. Müller Weingarten vom Typ PK 1000S mit einem Pressenhub von 300 mm, bei einer Stößelverstellung (SV) von ± 5 mm durchgeführt worden (Abb. 6).

Kurbelpressen gehören zu den weggebundenen Schmiedepressen. Vertreter dieser Maschinenart sind Pressen mit Kurbelgetrieben (Exzenter- und Kurbelpressen, Kniehebelpressen, Lenkhebelpressen sowie Doppelkurbelpressen) und Pressen mit Kurvengetrieben, bei denen der Maschinenstößel einen durch die Kinematik des Hauptgetriebes festgelegten Weg durchläuft. Die Umformkraft wird durch ein Hebelsystem aufgebracht, die Größe der Kraft ist dabei wegabhängig. Die Größe der vom Stößel ausübenden Kraft ist abhängig von der jeweiligen Stößelstellung [3]. Bei diesen Maschinen ist die Umformung dann beendet, wenn der Stößel seine untere Stellung (unterer Totpunkt – UT) erreicht hat.

3.1 Zweistufiges Präzisionsschmiedewerkzeug - Ritzelwelle

Um einen komplexen Materialfluss einzustellen und eine vollständige Formfüllung zu gewährleisten, erfolgte der hier betrachtete Präzisionsschmiedeprozess der Ritzelwellen in zwei aufeinander folgenden Umformoperationen.

Ähnlich wie bei den Zahnrädern, wurden die Rohteile in einem Wärmeschutzbehälter mit Glühkohle in sauerstoffarmer Atmosphäre erwärmt, um Randentkohlung und Verzunderung zu minimieren. Die Umformung erfolgte bei manueller Bestückung der Presse in der Vor- und Fertigschmiedestufe mit Hilfe eines am IFUM [6] entwickelten Werkzeugsystems für das Präzisionsschmieden der Ritzelwelle, dessen Aufbau und Funktionsprinzip in Abb. 5 dargestellt ist.

Die Vor- und Fertigschmiedestufen sind jeweils modular aufgebaut. In der ersten Umformstufe wird die Massenverteilung durch ein Vorwärts-Fließpressen eingestellt. Der Schaftbereich sowie der Wellenabsatz werden hierbei bereits nahezu vollständig ausgeformt. Die Zentrierung und Führung des einfahrenden Oberwerkzeugs wird über eine Gleitbuchse oberhalb der Verzahnungsmatrize im Unterwerkzeug erreicht. Durch Vorwärts-Fließpressen, Stauchen bzw. Formpressen werden in einer zweiten Umformoperation sowohl der Übergang zwischen dem Wellenabsatz und dem Wellenschaft als auch die Verzahnung geprägt [6].

In Abb. 6 ist die verwendete Müller-Weingarten Kurbelpresse mit SpeedFORGE-Antrieb, die Bauteile als Rohteil, Zwischenform und Fertigform, sowie das Ober- und Unterwerkzeug mit den angebrachten Weg-, Körperschall- und Schallemissionsaufnehmern dargestellt. Zwei Körperschallsensoren vom Typ Brüel & Kjaer (B & K) 4371 und 4393V in Kombination mit dem Ladungs-Strom-Wandler B & K 2646 wurden bei jeder Schmiedestufe eingesetzt.

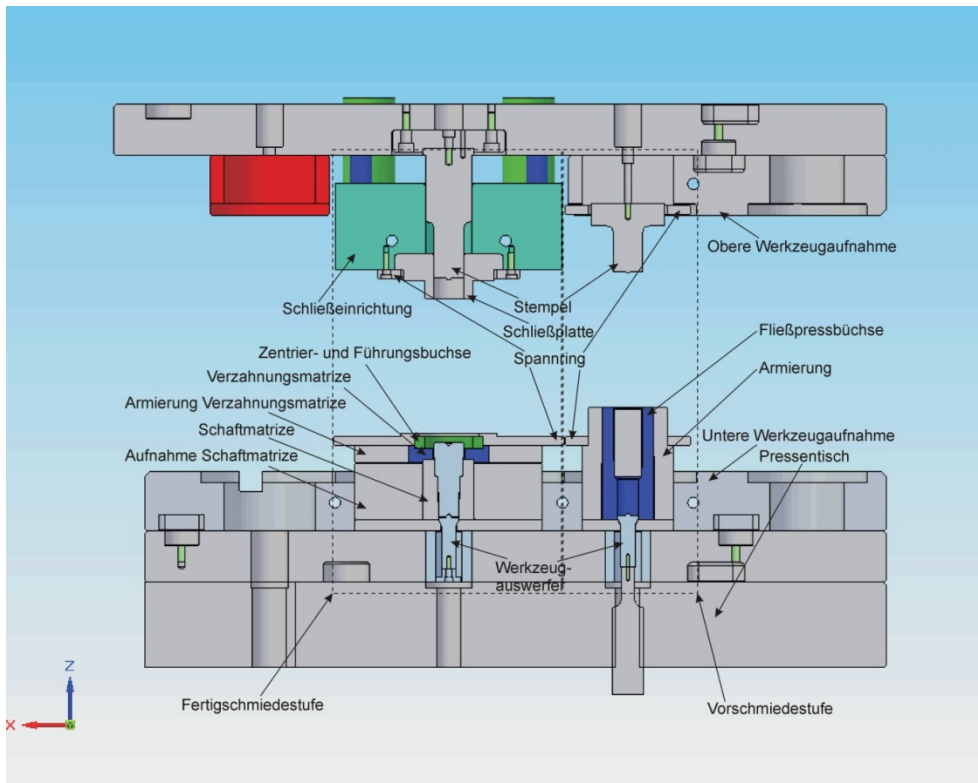


Abb. 5: Zweistufiges Werkzeugsystem zum Präzisionsschmieden der Ritzelwelle [6]



Abb. 6: Kurbelpresse mit zweistufigem Werkzeugsystem und angebrachter Zusatzinstrumentierung [2]

Zur Erfassung und Analyse transienter Schallemissionssignale wurde die gleiche Messkette, wie beim Präzisionsschmieden von Zahnrädern, mit dem AE-System AMSY-5 der Firma Vallen Systeme GmbH und den Schallemissionsaufnehmern, Sensor-Typ WSA der Firma Physical Acoustics Corporation in Kombination mit dem AE-Vorverstärker AEP4 der Firma Vallen Systeme GmbH, eingesetzt.

Die Schließplatte ist in Form einer hängend montierten Traverse in die obere Werkzeugaufnahme eingebaut, die sich gegen in den Stößel eingelassene Stickstofffedern abstützt. Um den Umformweg messtechnisch zu erfassen und spezifischen Prozessinformationen zuzuordnen, wurde die Traverse mit potentiometrischen Wegsensoren vom Typ KL 1000 und KL 250 der Firma Contelec mit Messbereichen von 100 und 25 mm instrumentiert. Die Signale wurden simultan mit den Körperschall- und Schallemissionssignalen aufgenommen.

Der Umformweg wurde erst nach dem Aufsetzen der Schließplatte auf die Verzahnungsmatrize der Fertigschmiedestufe erfasst, Abb. 7. Durch die mechanisch vorgegebene Pressenkinematik zeichnet sich dieser Maschinentyp durch die Möglichkeit aus, den Arbeitsablauf des Umformweges vor dem Aufsetzen der Schließplatte zu interpolieren und die einzelnen Ereignisse des Umformvorgangs der Vorschmiedestufe, wie das Aufsetzen des Zentrierdorns auf das Rohteil, das Einfahren des Stempels in die Fließpressbüchse und das Stauchen des Rohteils, den Anregungen im Körperschallsignal zuzuordnen [2].

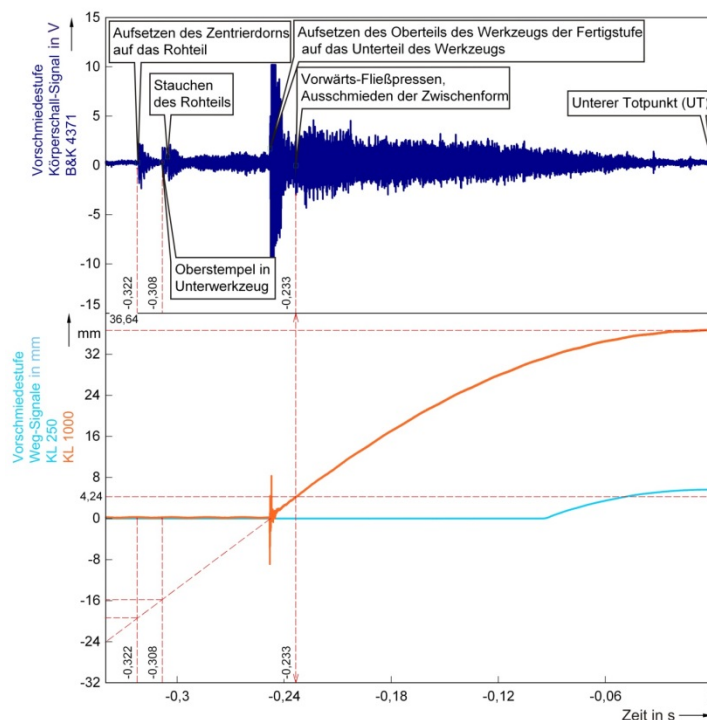


Abb. 7: Werkzeugweg und Körperschallsignale beim Präzisionsschmieden von Ritzelwellen in der Vorschmiedestufe [2]

Alle anderen Ereignisse der Vor- und Fertigschmiedestufe nach dem Aufsetzen der Schließplatte auf das untere Werkzeug, wie das Ausschmieden der Zwischenform durch Vorwärts-Fließpressen in der Vorstufe oder das Aufsetzen des Zentrierdorns auf die Zwischenform und das fertige Ausschmieden der Lager- und Wellenfläche, das Aufsetzen der Zwischenform auf den Boden und das Ausschmieden der Verzahnung in der Fertigstufe, wurden mit Hilfe der aufgenommenen Wegsignale den Körperschall- und Schallemissionssignalen zugeordnet, Abb. 7, Abb. 8, [2].

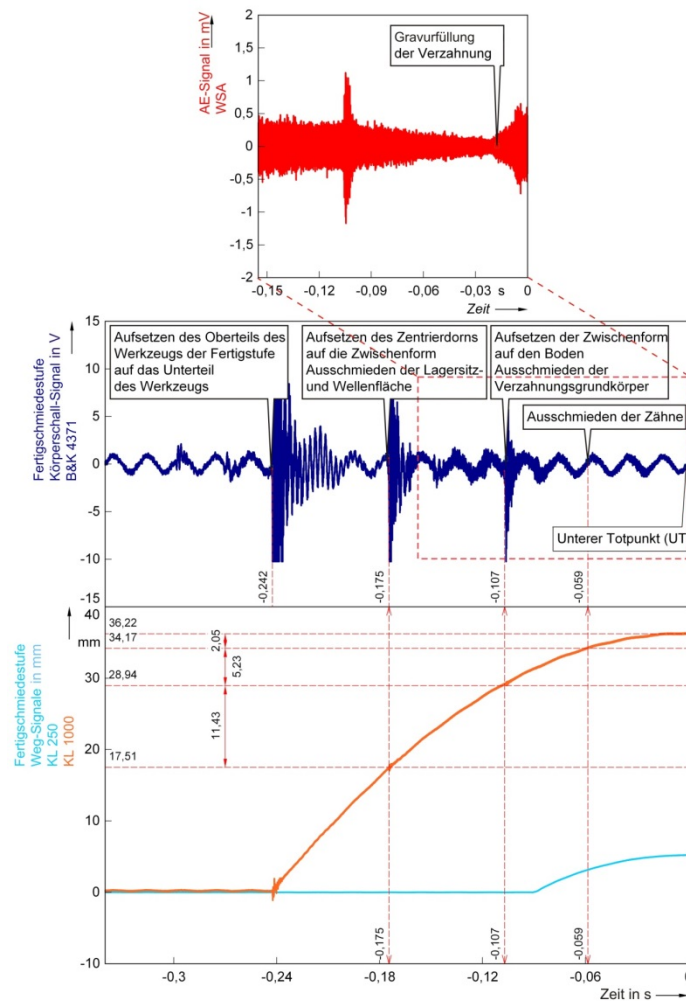


Abb. 8: Werkzeugweg sowie Körperschall- und Schallemissionssignale beim Präzisionsschmieden von Ritzelwellen in der Fertigschmiedestufe [2]

Einige Abläufe im Schmiedeverlauf, wie die Gravurfüllung der Verzahnung, sind in den Schallemissionssignalen, bedingt durch die höhere Empfindlichkeit der AE-Sensoren im Ultraschallbereich, deutlicher ausgebildet als in den Körperschallsignalen. Durch die mechanisch vorgegebene Stoßelkinematik und die mit Hilfe der Wegsensorik bestimmte Werkzeugbewegung lassen sich einzelne Schmiedevorgänge, wie zum Beispiel das Ausschmieden der Zähne, über den Werkzeugweg in den Körperschall- und Schallemissionssignalen zuordnen [2].

3.2 Werkstoffeinfluss

Einer der wesentlichen Faktoren, die den Umformwiderstand bestimmen, ist die chemische Zusammensetzung des Stahls, da diese die Geschwindigkeit des Rekristallisationsprozesses beeinflusst. Um den Einfluss unterschiedlicher Werkstückwerkstoffe auf den Prozess- und Signalverlauf und den im Prozesskennfeld definierten Gutteilbereich zu beurteilen, wurden an vier Werkstoffen für unterschiedliche Einsatzgebiete Untersuchungen durchgeführt. Im Einzelnen werden die folgenden Werkstoffe verwendet:

- ARMCO-Eisen
- Einsatzstahl 16MnCr5, (Werkstoffnummer 1.7131)
- Vergütungsstahl 42CrMo4, (Werkstoffnummer 1.7225)
- Wälzlagerstahl 100Cr6, (Werkstoffnummer 1.3505).

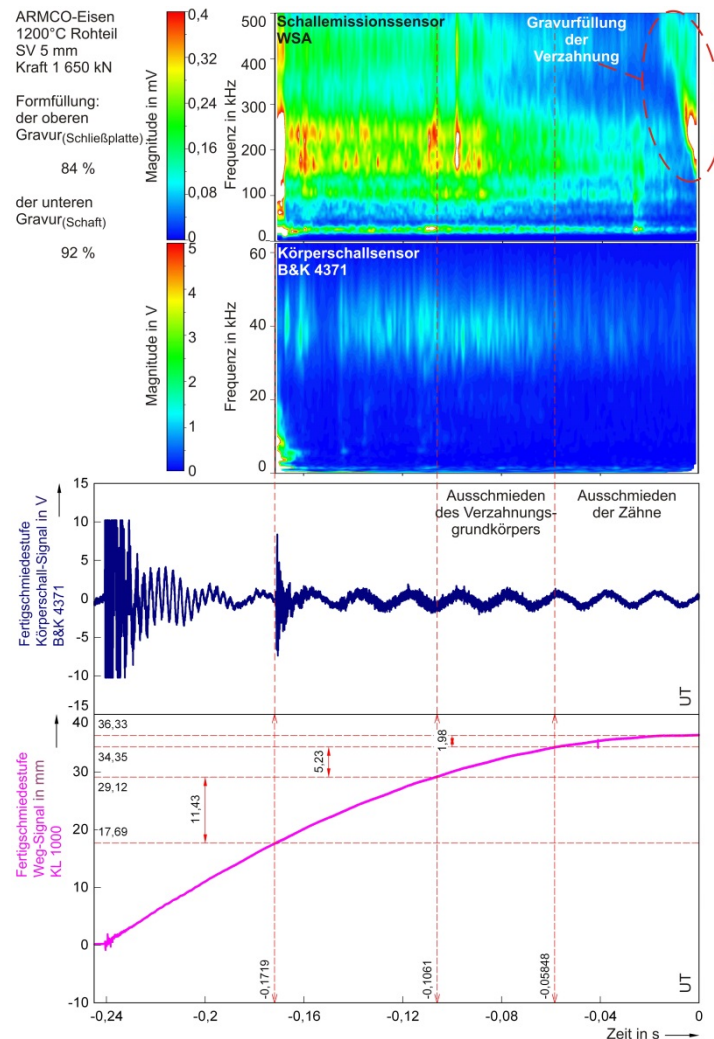


Abb. 9: Einfluss des Werkstoffs auf den Präzisionsschmiedevorgang von Ritzelwellen in der Fertigschmiedestufe – Schallemissions-, Körperschall- und Weg-Signale beim Präzisionsschmieden von ARMCO-Eisen [2]

Zur grundlegenden Ermittlung des Legierungseinflusses auf das Umformverhalten und entsprechend auf den Signalverlauf wurde der Werkstoff – ARMCO-Eisen als Referenz-Werkstoff mit in die Untersuchungsreihe aufgenommen, Abb. 9.

Nahezu reines Eisen, ARMCO-Eisen, zeigt beim Schmieden der Fertigform aufgrund seiner Eigenschaften, als weicher und duktiler Werkstoff, geringe Signalintensitäten in den Körperschall- und Schallemissionssignalen auf. Die beim Ausschmieden der Ritzelwellen aus Stahl intensiv auftretenden Ereignisse beim Aufsetzen der Zwischenform auf den Werkzeug-Boden in den Körperschall- und Schallemissionssignalen kommen beim ARMCO-Eisen nur beim Schallemissionssignal im Frequenzbereich von ≈ 25 kHz mit geringer Intensität des Signals vor.

Bei der Gravurfüllung der Verzahnung wird der Werkstoff durch den sich ergebenden kleineren Querschnitt in die Verzahnung verdrängt. Ähnlich, wie bei den Zahnrädern, führt die Gravurfüllung der Verzahnung zur Anregung von Emissionen im hochfrequenten Bereich von 150 kHz bis 500 kHz.

Die auftretenden höheren Signalintensitäten und Umformkräfte beim Präzisionsschmieden von Stählen, 16MnCr5 – Abb. 10, 42CrMo4 – Abb. 11 und 100Cr6 – Abb. 12, ergeben sich im Vergleich zum ARMCO-Eisen in Folge des größeren Legierungsanteils aus einer größeren Fließspannung und einem geringeren Umformvermögen. Von der chemischen Zusammensetzung des Werkstoffs hängt auch der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient ab, der als Maß für die Volumenvergrößerung bei

Temperaturerhöhung dient. Sein Einfluss auf das Schmiedeverhalten und entsprechend auf den Körperschall- und Schallemissionssignalverlauf zeigen die durchgeführten Untersuchungen. Mit steigendem Ausdehnungskoeffizient wird die Zwischenform immer früher durch den Zentrierdorn berührt

- bei 16MnCr5 (1200°C; $15,94 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) $t = -0,1713 \text{ s}$
- bei 42CrMo4 (1200°C; $16,85 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) $t = -0,175 \text{ s}$
- bei 100Cr6 (1200°C; $20,07 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) $t = -0,1769 \text{ s}$

und es setzt sich die Zwischenform immer früher auf den Boden auf:

- bei 16MnCr5 $t = -0,1063 \text{ s}$
- bei 42CrMo4 $t = -0,107 \text{ s}$
- bei 100Cr6 $t = -0,1086 \text{ s}$.

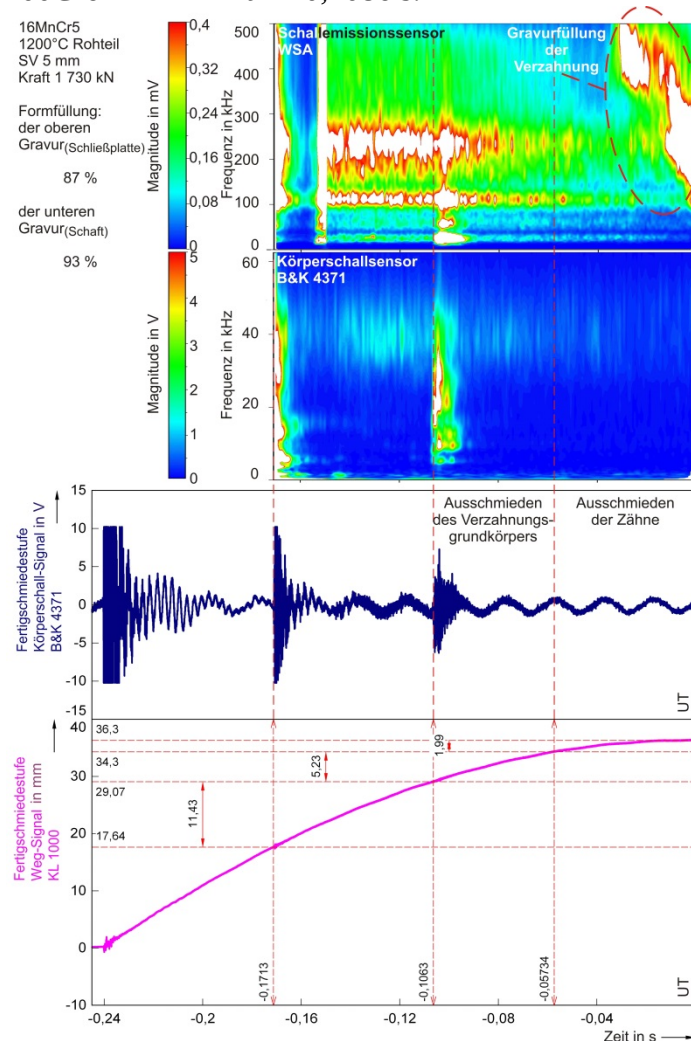


Abb. 10: Einfluss des Werkstoffs auf den Präzisionsschmiedevorgang von Ritzelwellen in der Fertigschmiedestufe – Schallemissions-, Körperschall- und Weg-Signale beim Präzisionsschmieden von 16MnCr5 [2]

Aufgrund der größeren Wärmeausdehnung des Werkstoffs 100Cr6 liegt bei manueller Bestückung die Zwischenform in der Fertigstufe im Bereich des Lagersitzes in einer größeren Höhenlage auf. Dieses führt zu einem längeren Umformweg von 11,85 mm, vom Aufsetzen des Zentrierdorns auf die Zwischenform bis zum Aufsetzen der Zwischenform auf den Werkzeugboden.

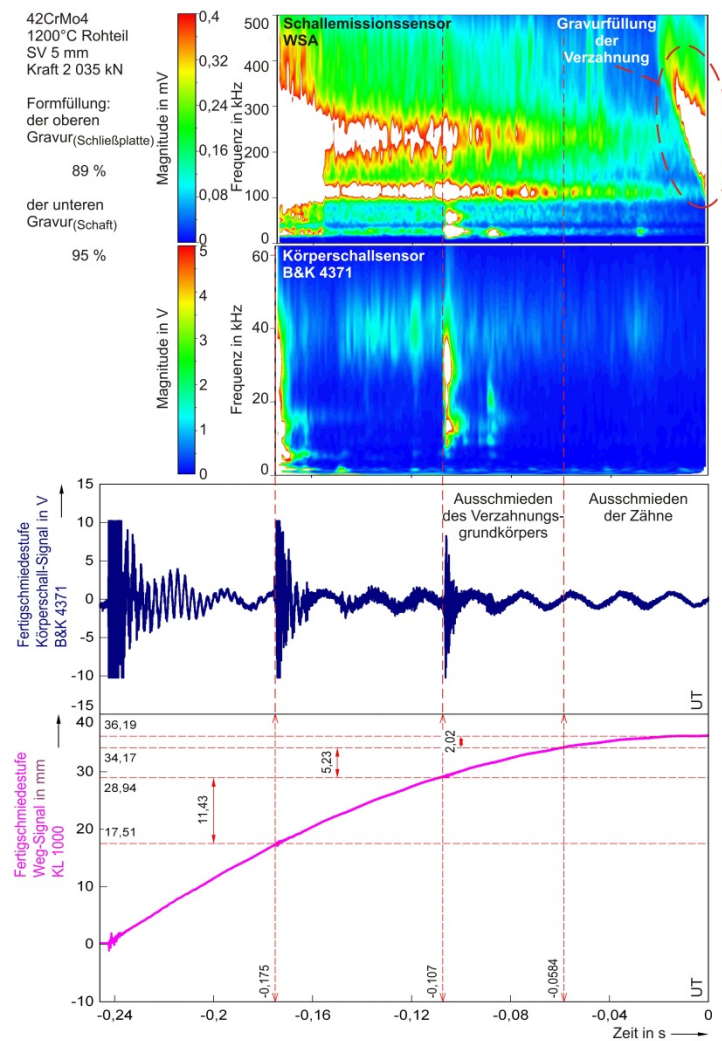


Abb. 11: Einfluss des Werkstoffs auf den Präzisionsschmiedevorgang von Ritzelwellen in der Fertigschmiedestufe – Schallemissions-, Körperschall- und Weg-Signale beim Präzisionsschmieden von 42CrMo4 [2]

Der Fließspannungszustand als eine Funktion der Umformungsbedingungen kann mit Hilfe der so genannten thermodynamischen Faktoren, die den Einfluss auf die Transformationsbedingungen wie die Temperatur, den Umformgrad und die Umformgeschwindigkeit enthalten, bei der Warmumformung berechnet werden [7]. Nach diesem Modell errechnete Werte der Fließspannung für die genannten Stahlwerkstoffe unter den vorherrschenden Umformbedingungen in der Fertigschmiedestufe der Ritzelwellen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Errechnete Werte der Fließspannung [2]

Werkstoff	Rohteiltemperatur in °C	Umformgrad	Umformgeschwindigkeit in s ⁻¹	Fließspannung in MPa
16MnCr5	1200	0,07	17	71
42CrMo4	1200	0,07	17	66
100Cr6	1200	0,07	17	67

Der niedrigere Wert der Fließspannung des 42CrMo4 im Vergleich zum 16MnCr5 erklärt die etwas schwächere Intensität der Schallemissionen bei der Gravurfüllung der Verzahnung. Neben dem mittleren Wert der Fließspannung beim Schmieden des 100Cr6 wirkt sich die Volumenzunahme durch Wärmeausdehnung unmittelbar auf den Umformwiderstand und somit auf den Schallemissionen beim Ausschmieden der Fertigform der Ritzelwelle aus. Entscheidend für die hohe Intensität der Emissionen, besonders im Bereich der Gravurfüllung der Verzahnung, sind mit zunehmender

Wärmeausdehnung die wachsende Reibkontaktfläche und der höhere Innendruck, der durch die Zunahme des Einsatzvolumens gegenüber dem Gravurvolumen im geschlossenen Gesenk entsteht [2].

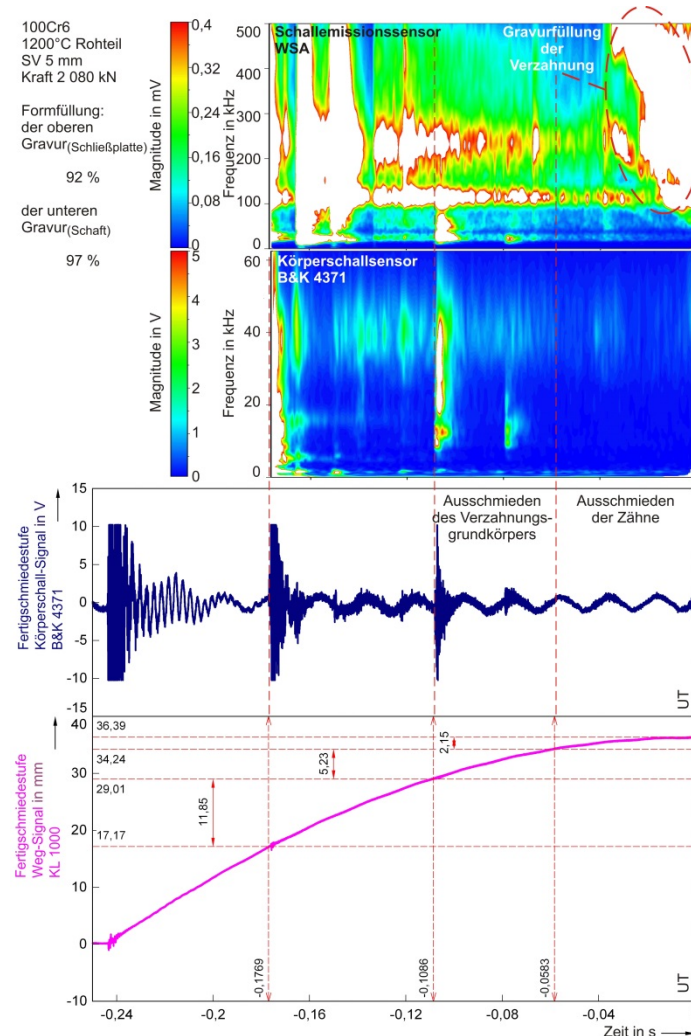


Abb. 12: Einfluss des Werkstoffs auf den Präzisionsschmiedevorgang von Ritzelwellen in der Fertigschmiedestufe – Schallemissions-, Körperschall- und Weg-Signale beim Präzisionsschmieden von 100Cr6 [2]

4 Zusammenfassung

Bei weggebundenen Pressen mit vorgegebener Arbeitseinstellung führt der Einsatz von verschiedenen Schmiedewerkstoffen mit unterschiedlichen Wärmeausdehnungs- und Umformverhalten aufgrund veränderter Fließspannungen, Reibbedingungen und Gravurfüllungen zu signifikanten Intensitäten in den Körperschall- und Schallemissionen. Eine empfindliche Körperschall- und Schallemissionsinstrumentierung bietet hier die Möglichkeit diese Informationen aufzunehmen und im Rahmen der Prozessüberwachung zu nutzen.

Aufgrund einer höheren Pressensteifigkeit und die durch die Antriebskinematik vorgegebene Arbeitsweise weisen die Körperschall- und Schallemissionssignale beim Schmieden der Ritzelwellen aus unterschiedlichen Werkstoffen sehr ähnliche Verläufe auf. Beim Schmieden von Zahnradern, die auf einer arbeitsgebundenen Umformmaschine gefertigt wurden, deren Umkehrpunkt nicht festgelegt ist, wurden hingegen deutliche Werkstoffeinflüsse auf die Signalverläufe festgestellt.

Über die Bestimmung von Prozesskennfeldern mit abgegrenzten Gutteilbereichen in Abhängigkeit der eingesetzten Werkstoffe ergeben sich Möglichkeiten, auch bei einem werkstoffabhängigen Umformungs- und Ausdehnungsverhalten, basierend auf einer Körperschall-, Schallemissions- und Wegsensorik eine Prozessüberwachung zu realisieren, mit der eine Qualitätsbewertung erreicht und Materialverwechslung erkannt werden kann [2].

Danksagung

Unser Dank gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung dieses Projektes im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 489 „Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile“ und besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Fr.-W. Bach für die Leitung und Betreuung dieses Projektes.

Referenzen

- [1] Böhm, V.; Kästner, M.; Gillhaus, R.; Haskamp, K.; Reimche, W.; Bach, F.-W.; Reithmeier, E.: Kapitel: Mess- und Prüftechnik, in „Prozesskette Präzisionsschmieden“. Hrsg.: Bach, Kerber, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2014, ISBN 978-3-642-34663-7, ISBN 978-3-642-34664-4 (eBook)
- [2] Böhm, V.: Beitrag zur Beurteilung von transienten Präzisionsschmiedevorgängen mittels Körperschall- und Schallemissionsdiagnostik, Dissertation, Berichte aus dem IW, 3/2013, Garbsen: PZH Verlag 2013, ISBN 978-3-944586-21-2
- [3] Dannenmann, E.; Lange K.: Kapitel: Grundlagen der Werkzeugmaschinen zum Umformen, in „Umformtechnik. Grundlagen“. Hrsg.: Lange, Berlin, Heidelberg, New York, Barselona, Hongkong, London, Mailand, Paris, Tokio: Springer, 2002, ISBN 3-540-43686-3
- [4] Reimche, W.; Böhm, V.; Bach, F.-W.; Odening, D.; Behrens, B.-A.: Zeitbereichsanalyse transienten Umformverhaltens zur Qualitätsbewertung beim Präzisionsschmieden von Hochleistungsbauteilen. Hrsg.: DGZfP e.V. Berichtsband-CD zur DACH-Jahrestagung 2012, <http://www.ndt.net/article/dgzfp2012/papers/mi1b2.pdf>
- [5] Behrens, B.-A.: Entwicklung eines automatisierten Präzisionsschmiedeprozesses mit integrierter Qualitätsprüfung. Düsseldorf: VDI Verlag, 1997, Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2 Nr. 445
- [6] Odening, D.: Werkstoffeinfluss auf das Prozess- und Schrumpfungsverhalten von Schmiedestählen beim Präzisionsschmieden. Dissertation, Berichte aus dem IFUM, 04/2013. Garbsen: PZH Verlag 2013, ISBN 978-3-944586-20-5
- [7] Spittel, M.; Spittel, T.: 2 Flow stress of steel, Introduction and Definitions, in “Materials. Metal Forming Data of Ferrous Alloys - deformation behaviour”. Hrsg.: H. Warlimont, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, Landolt-Börnstein – Group VIII Advanced Materials and Technologies Volume 2C1, 2009, DOI 10.1007/978-3-540-44760-3_3, ISBN 978-3-540-44758-0 (Print), ISBN 978-3-540-44760-3 (Online)