

Schall und Schwingung im Big-Data-Kontext

Multisensorisches Monitoring in der Warmmassivumformung

C. Glaubitz, M. Rothgänger, R. Reder, J. Peddinghaus, K. Brunotte

ZUSAMMENFASSUNG Die Warmmassivumformung stellt durch hohe Energieeinträge und kurze Taktzeiten besondere Anforderungen an die Prozessüberwachung. Ein multisensorisches Verfahren wird vorgestellt, das Körper- und Luftschallsignale synchron erfasst, in Frequenzbänder zerlegt und deren Bandenergien statistisch mit Prozessgrößen verknüpft. Eigenfrequenzverschiebungen und charakteristische Energiemuster ermöglichen die Klassifikation von Prozessabweichungen und liefern die Basis für Big-Data-gestützte Überwachungskonzepte.

STICHWÖRTER

Warmmassivumformung, Schwingungsanalyse, Prozessüberwachung

Multisensor process monitoring in hot bulk forming - Sound and vibration in a big-data context

ABSTRACT Hot bulk metal forming places special demands on process monitoring due to high energy inputs and short cycle times. A multi-sensory method is presented that synchronously records structure-borne and airborne sound signals, decomposes them into frequency bands, and statistically links their band energies to process-relevant variables. Natural frequency shifts and characteristic energy patterns enable the classification of process deviations and provide the basis for big data-supported monitoring methods.

1 Einleitung und Stand der Technik

Besonders bei der Herstellung sicherheitsrelevanter oder geometrisch komplexer Bauteile ist eine kontinuierliche Erfassung relevanter Prozessgrößen in der Warmmassivumformung unerlässlich, um Qualitätsschwankungen frühzeitig zu erkennen und Werkzeugschädigungen vorzubeugen. Klassische Überwachungsmethoden, beispielsweise auf Basis kontinuierlich erfasster Kraft- und Weg-Daten, liefern bereits valide Informationen über den zeitlichen Verlauf des Umformvorgangs und ermöglichen die Bestimmung charakteristischer Prozessmerkmale wie dem Werkzeugkontakt während der Umformung, dem Kraftmaximum oder der elastischen Rückfederung.

Diese Messgrößen bilden eine etablierte Basis zur Bewertung der Prozessführung. Ihre Aussagekraft ist jedoch begrenzt, wenn es um die Identifikation hochfrequenter, dynamischer Effekte geht, wie strukturmechanischer Resonanzen, tribologischer Instabilitäten oder kurzfristiger Störimpulse, beispielsweise infolge von Werkstückfehlpositionierungen [1]. Solche Phänomene äußern sich in Form schwacher Modulationen im Zeitverlauf klassischer Messgrößen, deren Amplituden im instrumentellen Grundrauschen liegen können und sich mit einer rein amplitudenbasierten Zeitdomänenanalyse nicht erfassen lassen. Stattdessen manifestieren sie sich in den Kraft- und Wegsignalen durch charakteristische Frequenzanteile, die erst mittels spektraler Signalanalyse identifizierbar werden [2].

Die Umsetzung einer robusten Zustandsüberwachung in der Warmmassivumformung erfordert die Berücksichtigung zahl-

reicher prozessimmanenter Einflussgrößen, die sowohl das Messsystem als auch die Signalqualität beeinträchtigen können. Neben den inhärent hohen Umformkräften wirken insbesondere die thermischen Bedingungen auf alle beteiligten Komponenten ein. Temperaturbedingte Drift- und Alterungseffekte in Sensorik und Elektronik erschweren die reproduzierbare Signalaufnahme. Hinzu kommen ausgeprägte dynamische Wechselwirkungen zwischen Werkzeug, Werkstück und Maschinenstruktur, die sich als elastische Verformungen und transiente Vibrationen äußern. Diese können sowohl das Sensorsignal überlagern als auch selbst Gegenstand der Analyse sein, sofern ihre spektralen Charakteristika korrekt erfasst und interpretiert werden. Die Herausforderung besteht in der Trennung zwischen prozessrelevanten Schwingungsanteilen und maschinenstrukturell bedingtem Störverhalten.

Wie *Chu et al.* darlegen, erfordern solche Verfahren neben geeigneter Sensorik auch die Anwendung frequenzsensitiver Analysealgorithmen, die besonders für die Detektion nichtlinearer oder modulierter Schwingungsanteile geeignet ist [3]. Dazu zählen in der Praxis vor allem die Fast-Fourier-Transformation (FFT), die Hüllkurvenanalyse auf Basis der Hilbert-Transformation zur Aufdeckung amplitudenmodulierter Impulse, zeitfrequente Verfahren, wie Kurzzeit-Fourier- und Wavelet-Transformation, sowie adaptive Methoden, wie die Hilbert-Huang-Transformation [3].

Ein weiterer Aspekt betrifft die schleichenden und kumulativen Veränderungen der Prozessbedingungen infolge von Werkzeugverschleiß oder veränderter Schmierstoffwirkung. Solche zeitabhängigen Mechanismen verändern die Signalcharakteristik nicht abrupt, sondern schrittweise und dabei unmerklich für kon-

ventionelle Auswertemethoden. Klassische Monitoringansätze sind aufgrund von Prozessrauschen und langsam fortschreitenden Signalveränderungen in ihrer Detektionsfähigkeit limitiert. Adaptive Analyseverfahren hingegen passen ihre Filter-, Modell- oder Schwellenparameter automatisch an das aktuelle Signal und dessen statistischen Hintergrund an. Dadurch bleiben sie auch dann empfindlich für allmähliche Prozess- oder Verschleißänderungen, wenn statisch parametrisierte Methoden durch das überlagerte Störrauschen maskiert werden und dadurch an Detektionsempfindlichkeit verlieren. Die Entwicklung sensitivitätsstarker, interpretierbarer Merkmale akustischer Signale ist daher eine zentrale methodische Aufgabe, vor allem vor dem Hintergrund der hohen Taktrate und begrenzten Eingriffszeitfenster [4].

Zur Realisierung dieser Prozessüberwachung eignen sich verschiedene Sensortechnologien. Piezoelektrische IEPE-Beschleunigungssensoren (Integrated Electronics Piezo-Electric) haben sich als anwendungsnahe Lösung zur Vibrationsanalyse (VA) etabliert. Sie erfassen mechanisch strukturgebundene Schwingungen im Frequenzbereich von etwa 10 Hz bis 4 kHz und ermöglichen die Detektion typischer Prozessanomalien wie Unwuchten, Lagerdefekte oder Maschinenresonanzen durch frequenzbasierte Merkmalsextraktion [2, 3]. Die Signalauswertung erfolgt typischerweise mittels frequenzanalytischer Verfahren, etwa der Hüllkurvenanalyse oder der Berechnung der spektralen Leistungsdichte.

Hochfrequente tribologische Phänomene, wie adhäsives Mikrogleiten, Schmierfilmbrisse oder plastische Mikroverformungen äußern sich dagegen durch impulsartige elastische Wellen im Bereich oberhalb von 20 kHz bis in den MHz-Bereich. Diese akustischen Emissionen (AE) erfordern spezialisierte Sensorik mit hoher Bandbreite, rauscharmen Vorverstärkern sowie einer reproduzierbaren mechanischen Kopplung. Entscheidend ist die Zeitauflösung des Wandlers, da AE-Impulse auf wenige Millisekunden begrenzt sind. Um sie unverfälscht zu erfassen, muss der Sensor Frequenzanteile oberhalb von etwa 300 kHz übertragen. In diesem Bereich arbeiten breitbandige Beschleunigungssensoren nicht mehr linear [2]. Trotz ihrer hohen Sensitivität ist der Einsatz von AE-Systemen in kontinuierlichen Fertigungsprozessen der Warmmassivumformung bislang durch hohe technische Anforderungen (breitbandig, temperaturbeständig) und Systemkosten (robuste Ankopplung, Abschirmung) limitiert und findet primär in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung Anwendung [5]. Aktuelle Arbeiten von *Gutierrez et al.* und *Li et al.* belegen, dass erst fortgeschrittene Datenreduktion und maschinelle Lernverfahren nötig sind, um aus den hochdimensionalen AE-Rohsignalen zuverlässig prozessrelevante Kenngrößen abzuleiten [6, 7].

Eine technisch wie wirtschaftlich relevante Alternative ist die Kombination aus klassischer VA und gerichteter Mikrofontechnik. Mikrofone erfassen luftgetragene Schallsignale ab etwa 20 Hz und erweitern das detektierbare Frequenzspektrum über die mechanische Sensorankopplung hinaus. Die parallele Erfassung strukturgebundener und luftgekoppelter Schwingungssignale ermöglicht eine differenziertere Analyse transients, überlagerter oder nichtlinearer Prozessstörungen. Voraussetzung ist die zuverlässige Korrelation der akustischen Signale mit prozessrelevanten Ereignissen.

Wie verschiedene Studien zeigen, spiegeln sich Veränderungen des Werkzeugzustands in typischen Mustern von Schwingungs- oder Schallsignalen wider. *Hase et al.* untersuchten verschiedene Verschleißmechanismen an einem Pin-auf-Block-Tribometerprüfstand und konnten Unterschiede in den Signalverläufen feststel-

len. Adhäsiver Verschleiß zeigte einen ausgeprägten Einzel-Peak bei rund 1,1 MHz, während abrasiver Verschleiß mehrere Peaks im niedrigeren Frequenzband zwischen 0,25 und 1 MHz erzeugte [8]. Auch *Ubhayaratne et al.* setzten Mikrofone in einem industriellen Stanzprozess ein und konnten neue und verschlissene Werkzeuge anhand der aufgenommenen Schallspektren voneinander unterscheiden [9]. Ihre Auswertung basierte auf der Analyse der Signalenergie in ausgewählten Frequenzbereichen.

Huang und Dzulfikri kombinierten Vibrationsmessungen mit datenbasierten Klassifikationsverfahren, um Werkzeugzustände unter realen Prozessbedingungen automatisiert zu erkennen [10]. Dabei zeigten sie, dass eine Merkmalsextraktion, basierend auf den Formparametern einer Verteilung, eine zuverlässige Unterscheidung ermöglicht.

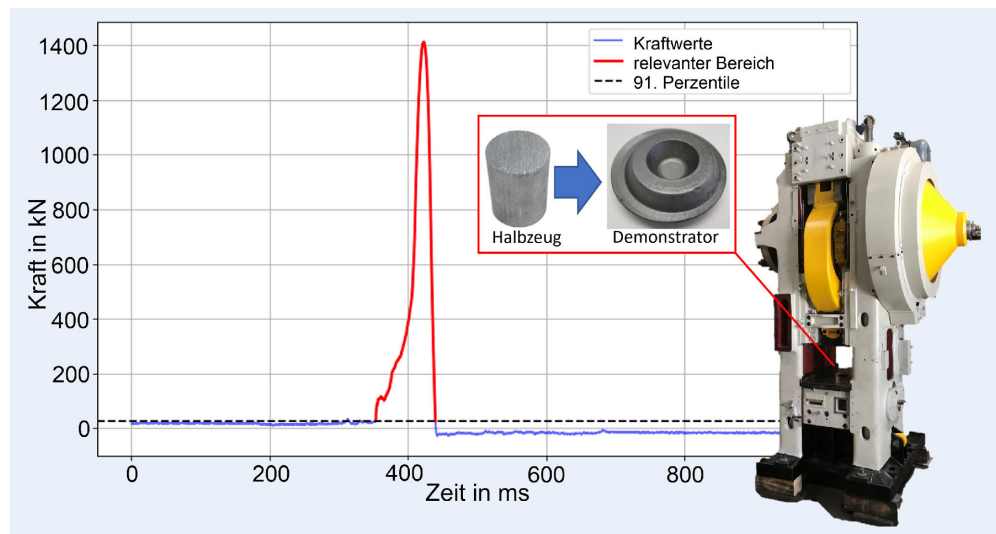
Den bisher genannten Arbeiten ist gemeinsam, dass sie entweder strukturgebundene Sensoren oder AE-Sensorik isoliert betrachten. Eine gleichzeitige Auswertung beider Signalarten unter realen Bedingungen eines zyklischen Warmumformprozesses wurde bislang nicht durchgeführt. Im Gegensatz zu bisherigen AE-basierten Monitoringsystemen, die vor allem das Erkennen spezifischer Fehlerszenarien fokussieren (vergleiche *El-Galy und Behrens* [11]), verfolgt die vorliegende Arbeit einen korrelativen Ansatz. Durch die Aufzeichnung von Körper- und Luftschallsignalen sowie eine mehrdimensionale statistische Analyse werden die Auswirkungen prozesskritischer Parameter auf spektrale Merkmale im Warmmassivumformprozess quantifiziert und interpretiert. Die Ergebnisse werden auf ihre potenzielle Eignung für eine multisensorische Prozessüberwachung im Rahmen von Big-Data-Analysen eingeordnet. Perspektivisch können datengetriebene Lernverfahren die identifizierten Schall- und Schwingungsmerkmale automatisiert erschließen, damit die aufwendige physikbasierte Interpretation ersetzen und das Einsatzspektrum auf die Korrelation mit Bauteilqualitätsmerkmalen erweitern.

2 Experimentelle Umsetzung: Signalverarbeitung und Datenanalyse

Die Prozessüberwachung im Rahmen der Schwingungsanalyse erfolgte in der vorliegenden Untersuchung über eine kombinierte Messstrategie, die strukturgebundene Vibrationen sowie luftgetragene akustische Signale simultan erfasst. Es wurden zwei triaxiale IEPE-Beschleunigungssensoren (Typ „VSM101“, ifm electronic) eingesetzt sowie ein, auf den Pressenraum gerichtetes Mikrofon („Elektret MI19“, Roga). Die Beschleunigungssensoren arbeiten mit einer Empfindlichkeit von 100 mV/g₀, einem linearen Messbereich von ±40 g₀ ($\approx \pm 392 \text{ m/s}^2$) und einer Bandbreite bis 4,5 kHz, wobei g₀ der Erdbeschleunigung entspricht.

Für diese Analyse wurden Signalanteile bis 4 kHz ausgewertet, um Verzerrungen nahe der Sensorresonanz auszuschließen. Für alle Kanäle wurde eine Abtastrate von 50 kHz gewählt (Nyquist-Grenze bei 25 kHz). Das IEPE-Mikrofon weist bei dieser Abtastrate ein nutzbares Spektrum von 20 Hz bis 30 kHz auf. Das Mikrofon ist im Versuchsaufbau 0,30 m vom umzuformenden Halbzeug entfernt. Die Beschleunigungsaufnehmer sitzen direkt am Pressenstößel beziehungsweise am Pressengestell, sodass ihre Körperschallstrecke höchstens 1,0 m beträgt. Damit ergeben sich sensorabstandsbedingte Signallaufzeiten von $\approx 0,88 \text{ ms}$ (Luftschall: 343 ms^{-1}) für das Mikrofon und $< 0,20 \text{ ms}$ (Körperschall im Stahl: 5000 ms^{-1}) für die Beschleunigungssensoren. Diese Verzögerung liegt unter der modulinternen, für alle Kanäle identi-

Bild 1 Exemplarischer Kraftverlauf während eines Schmiedehubs bei der Umformung eines zylindrischen Halbzeugs in die Demonstratorgeometrie mit der Exzenterpresse „Eumuco SP30d“
Grafik: Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM)



schen Latenz des verwendeten Messmoduls (ELM3602-0000 von Beckhoff) von $1,8 \pm 0,05$ ms, die daher als konstantes Zeit-Offset in der Korrelationsanalyse vernachlässigt werden kann.

Die methodische Grundlage der Korrelationsanalyse liegt in den experimentellen Prozessdaten, die in einer automatisierten Schmiedezelle erfasst wurden. Mit der Exzenterpresse „Eumuco SP30d“ wurden zylindrische Werkstücke aus Vergütungsstahl 1.7225 (42CrMo4) umgeformt, die zuvor induktiv erwärmt wurden. Die Kraft- und Wegverläufe wurden mit einer Abtastrate von 20 kHz für jeden Schmiedehub aufgezeichnet. Aus diesen Messdaten wurden charakteristische Kennwerte wie die Druckberührzeit und die Umformarbeit berechnet. Um belastbare statistische Beziehungen zwischen den akustischen Merkmalen und den betrachteten Prozessgrößen abzuleiten, wurde im Schmiedeversuch mit insgesamt 273 Umformungen jeweils die Pressentischhöhe, die Halbzeugtemperatur, die -masse oder die -positionierung im Gesenk innerhalb eines praxisüblichen Arbeitsfensters in diskreten Stufen variiert. Sämtliche übrigen Parameter blieben unverändert. Dieses Vorgehen gewährleistet eine Varianz in der jeweils untersuchten Größe als statistische Basis für die Korrelationsanalyse. Die gewählten Variationen repräsentieren nicht nur Versuchsfaktoren, sondern spiegeln zudem Stör- und Verschleißszenarien der Fertigung wider, wie fehlerhafte Einstellungen der Pressenzustellung nach einem Werkzeugwechsel, Fehltemperierungen durch schwankende Halbzeugmassen, welche wiederum durch zum Beispiel Chargenschwankungen auftreten können, sowie manuelle oder robotische Einlegeabweichungen.

In **Bild 1** wird exemplarisch ein aufgezeichneter Kraftverlauf eines Schmiedehubs für ein Bauteil dargestellt.

Der relevante Bereich der Druckberührzeit ist rot hervorgehoben und ergibt sich durch Festlegung eines Kraft-Grenzwertes, ab dem sich die Messwerte signifikant von der Nulllinie unterscheiden. In der vorliegenden Untersuchung wurde die 91. Perzentile als Grenzwert ausgewählt. Die 91-Perzentil-Schwelle erwies sich in Vorversuchen als optimal, weil bei niedrigeren Schwellen noch vereinzelte Rausch- und Leerlaufspitzen erfasst wurden, während bei höheren der Kraftanstieg zu früh abgetrennt wurde.

Alle nachfolgenden Verarbeitungsschritte werden ausschließlich auf das Zeitintervall der Druckberührzeit angewandt, da außerhalb dieses Fensters keine prozessrelevanten Informationen vorliegen. Der Kraftverlauf im relevanten Bereich lässt sich in

zwei Phasen unterteilen. Die erste Phase reicht vom Überschreiten des Grenzwertes bis zum Kraftmaximum, während die zweite Phase vom Kraftmaximum bis zum erneuten Erreichen des Grenzwertes andauert. Während der ersten Phase, bis zum Kraftmaximum, übt der Pressenstößel Druck auf das Werkstück aus. In der zweiten Phase nimmt die Kraft infolge elastischer Rückfederung wieder ab. Diese Phase wird als Entlastungsphase bezeichnet [12]. Die Länge der beiden Phasen sowie die Gesamtlänge, die der Druckberührzeit entspricht, werden als Parameter in den späteren Korrelationen berücksichtigt. Bei genauerer Betrachtung des Kraftverlaufs sind hochfrequente Störsignale in Form von Grundrauschen erkennbar, die das Nutzsignal überlagern. Um den Zeitpunkt der Grenzwertüberschreitung präzise zu bestimmen, ist folglich eine Filterung notwendig. Da herkömmliche Tiefpassfilter diese Störungen nicht vollständig beseitigen können, wird das Signal durch eine geeignete Glättungsmethoden, wie im Folgenden beschrieben, verarbeitet.

In **Bild 2** wird der Zeitraum rund um das Kraftmaximum abgebildet. Der blaue Verlauf repräsentiert dabei das unverarbeitete Kraftsignal, während der rote Verlauf die mithilfe eines Savitzky-Golay-Filters (SG-Filter) geglätteten Werte darstellt. Dieses etablierte Filterungsverfahren wurde gewählt, weil so hochfrequentes Rauschen reduziert wird, ohne steile Flanken und Maxima merklich zu verfälschen.

Der SG-Filter nutzt ein gleitendes Fenster um Datenpunkte über ein Polynom niedrigen Grades mit der Methode der kleinsten Quadrate anzupassen. Der zentrale Punkt dieses Fensters wird durch den Wert des Polynoms an dieser Stelle ersetzt. Dieses Verfahren wird für alle Datenpunkte wiederholt, wodurch ein geglättetes Signal entsteht. Die Vorteile des SG-Filters bestehen darin, dass er Form und wesentliche Merkmale des Signals erhält, Spitzenwerte und andere signifikante Charakteristika nicht übermäßig abschwächt und dabei effizient hochfrequentes Rauschen reduziert [13]. Um das mit dem SG-Filter geglättete Signal, wie in **Bild 2** dargestellt, weiter zu optimieren, wird zusätzlich ein Medianfilter angewendet. Dabei ersetzt dieser jeden Datenpunkt durch den Medianwert innerhalb eines festgelegten Fensters [14]. Das Medianfenster umfasst 31 aufeinanderfolgende Abtastwerte (15 vor- und 15 nachgelagerte Werte), was bei der genutzten Abtastrate von 20 kHz einer Glättungsbreite von rund 1,55 ms

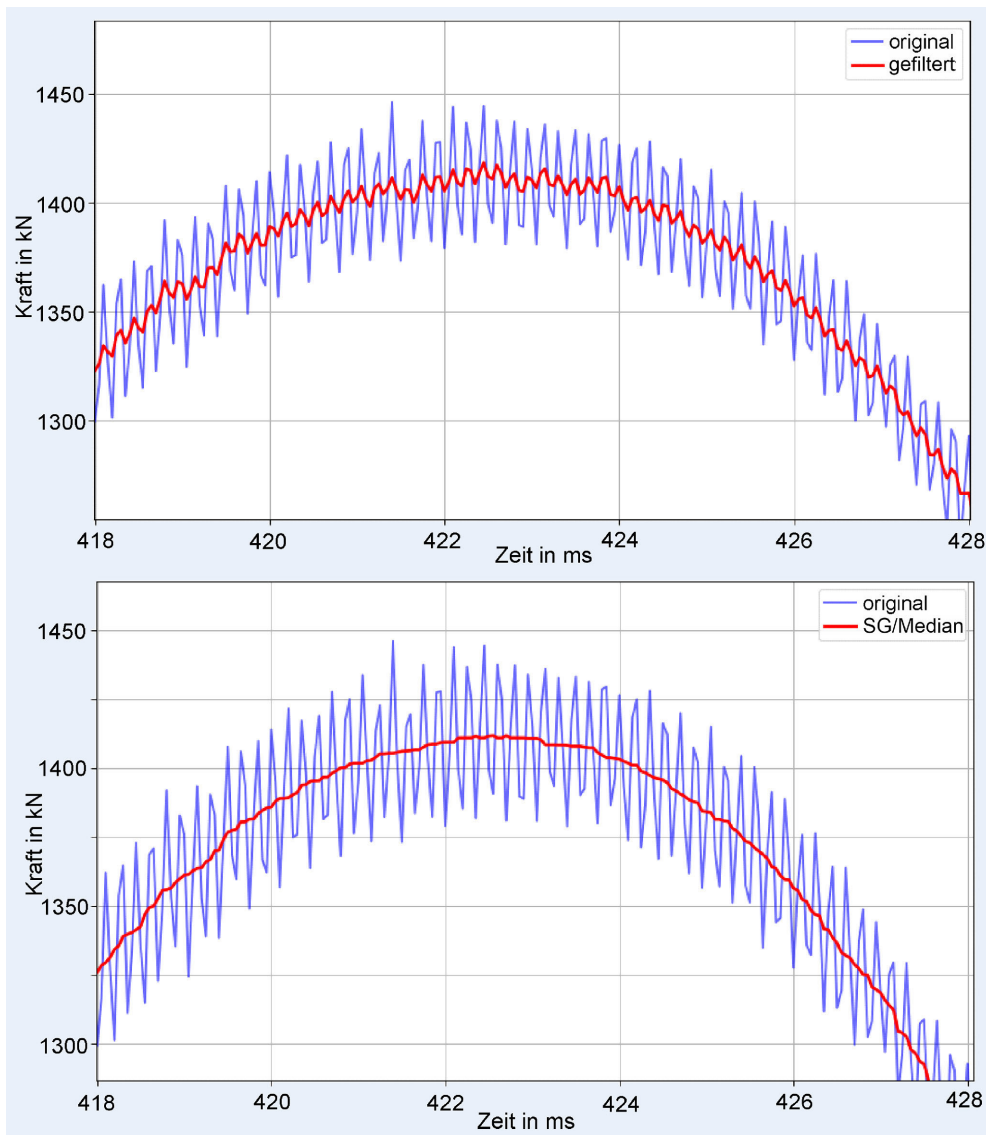


Bild 2 Kraftverlauf (blau), nach Savitzky-Golay-Filterung (oben) und nach Anwendung der Filterung SG + Median (unten). Grafik: IFUM

entspricht. Bild 2 veranschaulicht die Auswirkungen der kombinierten Anwendung von SG- und Medianfilter.

Beim Schmieden beschreibt die Umformarbeit die erforderliche mechanische Arbeit, um ein Werkstück durch plastische Verformung in die gewünschte Form zu bringen. Die Umformarbeit berechnet sich durch Integration der Umformkraft über den Umformweg, der während des Schmiedevorgangs mit derselben Abtastrate f_s von 20 kHz wie die Kraftwerte erfasst wird. Die erfassten Wegmessdaten weisen, ähnlich wie die Kraftverläufe mit einer Kombination aus SG-Filter und anschließendem Medianfilter geglättet werden.

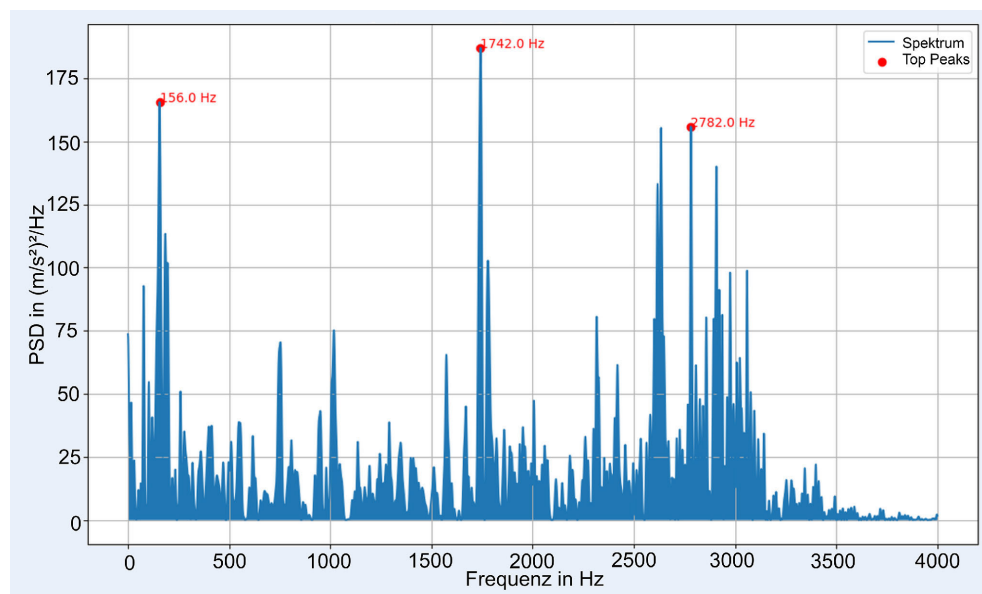
Die Sensordaten werden ohne Vorverarbeitung beziehungsweise Filterung gespeichert und anschließend werden alle sieben Kanäle (sechs Beschleunigungsachsen und das gerichtete Mikrofon), wie bereits beschrieben, auf den Zeitraum der Druckberührzeit zugeschnitten.

Ein abruptes Abschneiden entspricht einer Fensterung mit einem Rechteckfenster, dessen breitbandiges Spektrum Signalleistung in benachbarte Frequenzen streut (Leakage-Effekt) [15]. Statt eines Rechteckfensters wird ein Kaiser-Fenster verwendet,

dessen Gewichtungsfunktion die Signalländer kontinuierlich gegen Null abklingen lässt und so das Streuen in benachbarte Frequenzbereiche reduziert [16]. Der Kaiser-Fensterstyp besitzt einen einstellbaren Formparameter β . Ein kleiner β -Wert lässt das Fenster eher rechteckig erscheinen und führt zu einer geringen Nebenkeulendämpfung bei hoher Auflösung, während ein großer β -Wert das Fenster verbreitert und zu einer stärkeren Dämpfung bei geringerer Auflösung führt. In der vorliegenden Arbeit wurde $\beta = 5$ gewählt, da dieser Wert zwischen den nur schwach dämpfenden Einstellungen kleiner β -Werte (≈ 3) und den deutlich hauptkeulenverbreiternden Einstellungen oberhalb von $\beta \approx 6$ liegt und somit einen günstigen Kompromiss aus Nebenkeulendämpfung und Frequenzauflösung bietet [16, 17]. Nach dem Fenster wird das Signal per Zero-Padding auf $N = 65536 = 2^{16}$ Punkte erweitert. Diese Zweierpotenz beschleunigt die FFT und legt ein feines Abtastraster von $\Delta f \approx 0,76$ Hz (bei $f_s = 50$ kHz) über das berechnete Spektrum, sodass schmale Komponenten im Bereich 0,2–4 kHz lokalisierbar sind.

Das Spektrum zeigt bei der Auswertung stets einen dominanten Anteil um ≈ 3 kHz, der im Zeitsignal jeweils unmittelbar nach der Umformung auftritt und vermutlich auf den Bremsimpuls des

Bild 3 Leistungsdichtespektrum eines Beschleunigungssensors nach Fade-Out-Filterung.
Grafik: IFUM



Stößels zurückzuführen ist. Dieser Frequenzbereich wird in den folgenden Verarbeitungsschritten separat behandelt.

Die Anwendung einer Fade-Out-Funktion führt zu einer Modifikation des Frequenzspektrums, deren Ausmaß von der Charakteristik des Ausblendverlaufs abhängt. Da unklar ist, ob der Signalanteil zum Ende des Umformhubes eine reine Störung darstellt, wird ein moderater Fade-Out-Ansatz gewählt, um das Spektrum nicht übermäßig zu beeinflussen. Hierbei kommt eine Tukey-Fensterfunktion zum Einsatz, welche einen einstellbaren Parameter α bietet, mit dem der Verlauf des Fade-Outs gesteuert werden kann [17]. Für $\alpha = 0$ bleibt das Signal scharf erhalten, während bei $\alpha = 1$ der gesamte Fade-Out weich und vollständig kosinusförmig verläuft. Ein moderater Wert, beispielsweise $\alpha = 0,4$ sorgt für eine ausgewogene Mischung aus spektraler Präzision und sanftem Signalabfall, wodurch plötzliche Signalabrisse sowie starke Frequenzartefakte vermieden werden. Die sanfte Absenkung verschiebt den Energieanteil des Bremsimpulses in tiefere Frequenzen und reduziert dessen Wirkung, ohne die prozessrelevanten Spektren zu verfälschen.

Für jedes so vorverarbeitete Signal wird per FFT die Leistungsdichte berechnet. Anschließend wird das Spektrum in 200-Hz-Bänder segmentiert. Die Bandenergie entspricht der integrierten spektralen Leistung innerhalb des jeweiligen 200-Hz-Fensters und ist damit proportional zur mittleren kinetischen Schwingungsenergie. Hohe Werte kennzeichnen eine starke dynamische Anregung in genau diesem Frequenzbereich, niedrige Werte eine schwach ausgeprägte Schwingung. Die mittlere Bandenergie wird als eigene Größe in einem Data-Frame abgelegt, wodurch eine eindeutige Zuordnung zu den synchron erfassten Kraft- und Weggrößen ermöglicht wird.

Zur Bewertung der Zusammenhänge werden Pearson-, Spearman- und Kendall-Koeffizienten ermittelt. Wegen seiner Robustheit gegenüber nicht-linearen Abhängigkeiten dient Spearman (Schwelle $|\rho| \geq 0,5$) als Hauptkriterium zur Bewertung der Ergebnisse in der vorliegenden Untersuchung.

Bild 3 zeigt beispielhaft ein Leistungsdichtespektrum eines Beschleunigungssensors nach Anwendung des Fade-Out-Filters.

Das ursprüngliche Spektrum weist eine um 3000 Hz höhere spektrale Energiedichte auf, als nach dem Fade-Out. Die Abkling-

phase moduliert das Signal mit einer glatten Hüllkurve. Dadurch verlagert sich Energie in tiefere Frequenzen. Das modifizierte Leistungsspektrum sowie die höchsten Peaks nach Anwendung des Fade-Outs werden als zusätzlicher Datensatz in die Korrelationsanalyse einbezogen.

Die Datenerfassung und -speicherung erfolgt mithilfe der auf Zeitreihen spezialisierten Datenbank „InfluxDB“, deren Struktur eine flexible Verwaltung der umfangreichen Prozessdaten gewährleistet.

Die resultierenden Korrelationsmatrizen quantifizieren die Stärke linearer Zusammenhänge zwischen den Attributen eines Datensatzes. Ein Wert von -1 entspricht einer starken negativen (antiproportionalen) Korrelation und wird in den Matrizen blau dargestellt, während ein Wert von +1 auf eine starke positive (proportionale) Korrelation hinweist und als rote Kachel in den Matrizen erscheint. **Bild 4** zeigt einen Ausschnitt aus der sich ergebenden Heatmap. Bei insgesamt $n = 273$ Schmiedehüben genügt ein Pearson-Koeffizient von $|\rho| \approx 0,12$, um das 5-%-Signifikanzniveau zu erreichen. Alle dargestellten Werte über $|\rho| = 0,30$ liegen daher mit $p \ll 0,001$ im hochsignifikanten Bereich. Im nächsten Kapitel werden die detektierten Korrelationen diskutiert.

3 Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden die Einflüsse zentraler Prozessgrößen (Tischhöhe, Einlegeposition, maximale Umformkraft, Halbzeugtemperatur, Druckberührzeit und Umformenergie) auf spektrale Merkmale der Schwingungssignale ausgewertet. Betrachtet werden jeweils ausgeprägte Eigenfrequenzen der beiden Beschleunigungssensoren sowie Bandenergien inklusive des ergänzenden Mikrofonkanals. Zur Separierung des Bremsimpulses werden Rohsignal und Fade-Out-Variante gegenübergestellt.

3.1 Tischhöhe

Mit steigender Tischhöhe verändern sich ausschließlich die Spitzenfrequenzen der beiden Beschleunigungssensoren, die Messdaten für Energiebänder und das Mikrofon zeigen keinen Einfluss. Für den Sensor am Stößel nimmt die niedrigste erfasste

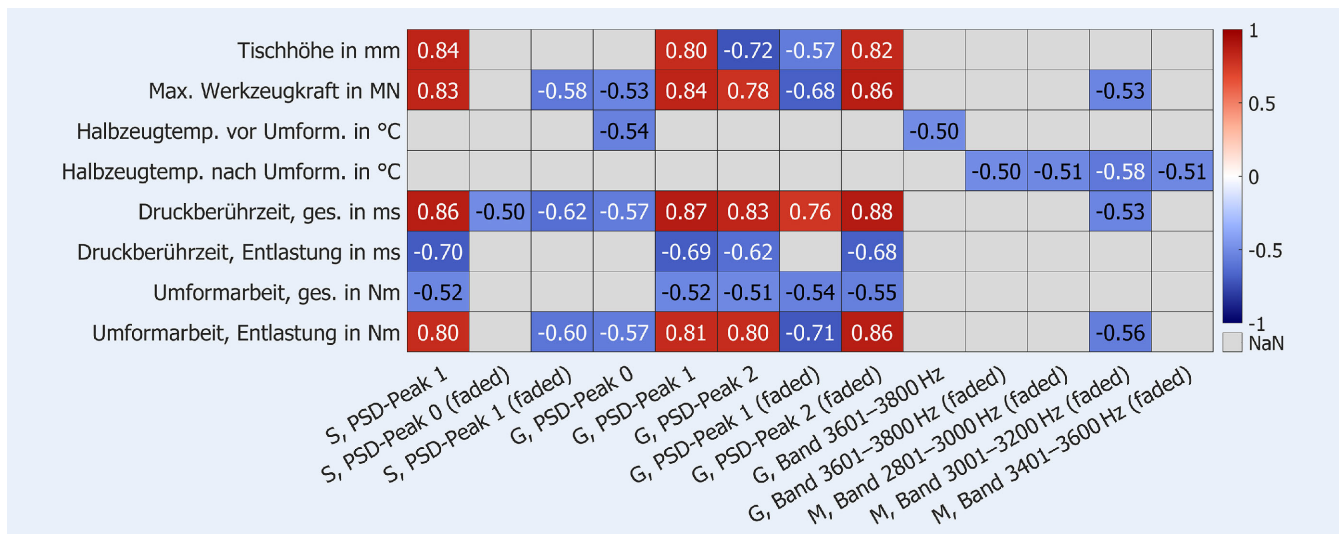


Bild 4 Auszug aus der Korrelationsmatrix des beeinflussten Schmiedeprozesses zur Darstellung der Korrelationen, S = Beschleunigungssensor am Pressenstößel, G = Beschleunigungssensor am Pressengestell, M = Mikrofon, Band = Energie im entsprechenden Frequenzband, NaN = keine Korrelation gefunden. Grafik: IFUM

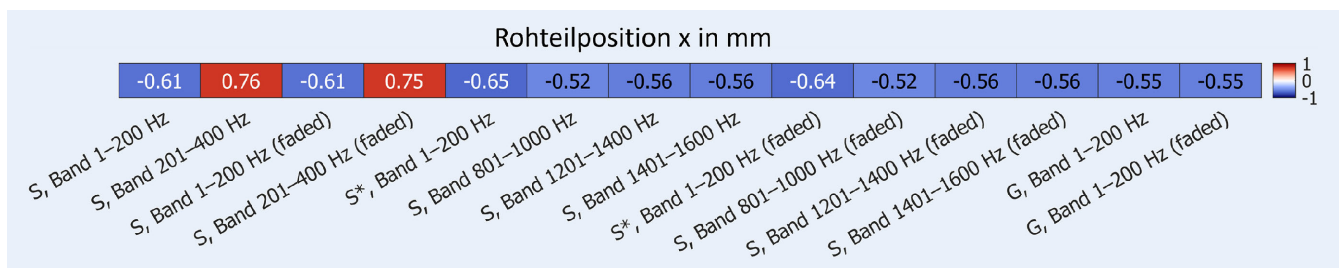


Bild 5 Auszug aus der Korrelationsmatrix bezüglich Fehlpositionierungen des Halbzeugs im Umformwerkzeug; S = Beschleunigungssensor am Pressenstößel, G = Beschleunigungssensor am Pressengestell, Band = Energie im entsprechenden Frequenzband, *weiterer Kanal desselben Sensors. Grafik: IFUM

Eigenfrequenz mit der Pressenzustellung deutlich zu ($\rho = +0,84$). Am Gestell verhält sich die niedrigste Eigenfrequenz analog ($\rho = +0,80$), während eine noch höhere Resonanzfrequenz desselben Aufnehmers zunächst eine Abnahme zeigt ($\rho = -0,72$).

Dieses scheinbare Gegenverhalten entsteht, weil der breitbandige Bremsimpuls des Stößels in genau diesem Frequenzbereich Energie einträgt und so die Peak-Position verfälscht. Wird der Störimpuls per Fade-Out herausgefiltert, kehrt sich das Bild um und der zuvor sinkende Frequenzanteil steigt an (faded, $\rho = +0,82$), während die erste Resonanzfrequenz des Gestells negativ korreliert (faded, $\rho = 0,57$). Insgesamt verschieben sich damit alle relevanten Eigenfrequenzen in dieselbe Richtung.

3.2 Einlegeposition des Halbzeuges

Eine Abweichung der Einlegeposition in den Pressenraum zeigt sich ausschließlich in den Körperschallkanälen, wie in **Bild 5** dargestellt.

Das Mikrofonsignal bleibt unbeeinflusst. Am Beschleunigungssensor des Pressenstößels sinkt die Bandenergie im Band 1–200 Hz deutlich ($\rho = 0,61$), während sie im Band 201–400 Hz markant zunimmt ($\rho = +0,76$). Das Vorzeichenpaar bleibt nach dem Fade-Out unverändert ($-0,61/+0,75$). Die Verschiebung entsteht demnach während der eigentlichen Umformphase und wird nicht vom Bremsimpuls verursacht. Damit deckt sich der Befund mit *Saberi et al.*, die an einem Gegenschlaghammer zeigen, dass

die freien Nachschwingungen des Ambosses nach rund 0,25 s ausgedämpft sind und energetisch weniger als 5 % des Hubes ausmachen, sodass nach dem Abklingen keine zusätzlichen Frequenzanteile in das Spektrum eingehen [18]. Die höheren Energiebänder, inklusive der faded-Varianten, zeigen lediglich eine durchgehend schwache, negative Korrelation ($-0,56 \dots -0,52$) und bieten damit keine zusätzliche Trennschärfe für die Detektion von Fehlpositionierungen.

Der am Pressengestell positionierte Beschleunigungssensor zeigt nur im Band 1–200 Hz eine moderate Abnahme der Energie ($\rho = -0,55$), die sich durch den Fade-Out-Filter nicht verändert. Offenbar überträgt der durch die Fehlpositionierung entstehende Kraftfluss eine geringe lokale Auslenkung auf den Maschinenrahmen, die durch eine leichte Stößelverkipfung beziehungsweise Schrägstellung begründet werden kann. Eine Bestätigung des Zusammenhangs erfordert weitere Messpunkte, wie etwa symmetrisch platzierte Beschleunigungs- oder Neigungssensoren.

Zusammengefasst entzieht ein Versatz beim Einlegen des Halbzeugs der Maschinenstruktur zunächst Energie im niedrigsten Eigenfrequenzbereich, verschiebt aber einen Teil davon in das nächsthöhere Frequenzband des Sensors am Stößel. Ein vergleichbares Umlagern von Energie aus dem Grund in das nächsthöhere Frequenzband wurde auch von *Ma et al.* beobachtet, die den Effekt ebenfalls auf einen außermittigen Kraftfluss zurückführen, der niederfrequente Biegeschwingungen dämpft und höhere Anteile anregt [19]. Das charakteristische Muster liefert

ein Detektionsfeature, mit dem sich Fehlpositionierungen ohne zusätzliche Wegsensorik erkennen lassen.

3.3 Maximale Umformkraft

Bei Auswertung der maximalen Werkzeugkraft treten ausschließlich einzelne Spitzenfrequenzen der beiden Körperschallsensoren sowie ein Mikrofonband im oberen Luftschallbereich in Erscheinung. Die Rohsignale und Fade-Out-Varianten zeigen dabei teils entgegengesetzte Korrelationsvorzeichen.

Auf der Stößelseite steigt die niedrigste ausgeprägte Eigenfrequenz im Rohsignal stark an ($\rho = +0,83$). Nach Entfernung des Bremsimpulses kehrt sich das Vorzeichen jedoch ins Negative ($\rho = -0,58$) und zeigt die Überlagerung der eigentlichen Dynamik. Nach der Bereinigung dieses Einflusses, deutet der negative Zusammenhang darauf hin, dass eine hohe Presskraft die Struktur während der Umformphase geringfügig nachgiebiger macht, sodass die betreffende Eigenfrequenz abnimmt. Auf der Gestellseite sinkt die niedrigste Eigenfrequenz im Rohsignal ($\rho = -0,53$), während die beiden nächsthöheren Frequenzpeaks deutlich positiv mit der Kraft korrelieren ($\rho = +0,84$ beziehungsweise $\rho = +0,78$). Nach Fade-Out sinkt die erste dieser höheren Frequenzen ($\rho = +0,68$), wohingegen die zweite noch stärker ansteigt ($\rho = +0,86$).

In Summe weist dieses Muster darauf hin, dass bei hoher Werkzeugkraft die Steifigkeit im unteren Frequenzbereich etwas nachlässt, während gleichzeitig höherfrequente Anteile verstärkt angeregt werden. Es findet eine Umverteilung der Schwingungsenergie innerhalb der Pressenstruktur statt. Eine valide mechanische Erklärung würde jedoch eine modale Gesamtmessung voraussetzen.

Das Mikrofonband 3,0–3,2 kHz zeigt nach Fade-Out eine negative Korrelation (faded, $\rho = -0,53$). Vermutlich verschiebt ein härterer Schlag den Luftschallanteil in höhere Frequenzen, sodass der hier betrachtete Ausschnitt abgeschwächt erscheint. Eine ähnliche Verlagerung der Schwingungsenergie in höhere Frequenzanteile wurde von Song *et al.* bei einer Schraubpresse nachgewiesen. Mit wachsender Schlagenergie nahm dort der Beitrag des zweiten Schwingungsanteils merklich zu, während die Grundschwingung an Bedeutung verlor [20].

3.4 Halbzeugtemperatur vor und nach Umformung

Bezüglich der Halbzeugtemperatur lassen sich in den Schwingungsdaten nur zwei eindeutige Zusammenhänge nachweisen. Die Grundresonanz des am Pressengestell montierten Sensors sinkt signifikant ($\rho = -0,54$), sobald das Werkstück wärmer in das Gesenk einlegt wird. Ein plausibler Grund ist die geringere Steifigkeit im Werkzeug-Werkstück-Kontakt. Je höher die Umformtemperatur, desto geringer ist die Fließspannung des Materials, desto kleiner ist die Stoßsteifigkeit und damit auch die Eigenfrequenz der unmittelbar angeregten Tischstruktur. Auch nimmt die Bandenergie im Gestellsensor zwischen 3,6 und 3,8 kHz ab ($\rho = -0,50$). Zusammen zeigen beide Signale, dass eine höhere Rohteiltemperatur das dynamische Steifigkeitsniveau verringert und damit sowohl niedrige Eigenfrequenzen als auch ausgewählte hochfrequente Energiebänder dämpft.

Für die Werkstücktemperatur des Schmiedestückes nach der Umformung wurden nur negative Korrelationen ermittelt. Der am Pressengestell montierte Sensor reagiert nur in einem schma-

len Hochfrequenzband, während das gerichtete Mikrofon über drei benachbarte Luftschallbänder anspricht. In allen Fällen nimmt die Bandenergie ab, wenn das Schmiedeteil wärmer aus dem Gesenk kommt. Ein wärmeres Werkstück besitzt bei Aufschlag und Abheben eine geringere Kontaktsteifigkeit, welche vermutlich die hochfrequenten Rahmenresonanzen als auch die kurzzeitigen Luftschallimpulse dämpft. Von einem vergleichbaren Effekt berichten Mayr *et al.*, die bei der drehenden Bearbeitung in einer CNC-Fräse sinkende Eigenfrequenzen bei steigenden Spindeltemperaturen erfassten [21].

Die geringere Anregung bei steigenden Temperaturen zeigt sich im Pressengestell als reduzierte Körperschallenergie um 3,7 kHz und im Mikrofon als abgeschwächter Luftschall zwischen 2,8 kHz und 3,6 kHz, was sich ebenfalls mit den Ergebnissen von El-Galy und Behrens deckt [11]. Bemerkenswert ist, dass niedrigere Frequenzbereiche und sämtliche Kanäle des ersten Beschleunigungssensors unbeeinflusst bleiben. Die Temperaturinformation liegt also fast ausschließlich in den hochfrequenten Signalanteilen.

3.5 Druckberührzeit

Eine längere Druckberührzeit geht mit einem Rückgang der jeweils tiefsten ausgeprägten Eigenfrequenz beider Körperschallsensoren einher (Stößel: $\rho = -0,53$; Gestell: $\rho = -0,57$). Dieses Verhalten beruht vermutlich auf einer Verringerung der effektiven Systemsteifigkeit k_{eff} . Während der länger andauernden Kontaktphase entsteht durch elastische und elastoplastische Verformungen von Werkzeug und Werkstück eine zusätzliche Feder, die seriell zum strukturellen Federpfad der Maschine wirkt. Die resultierende Absenkung von k_{eff} reduziert die Eigenfrequenzen f_0 und bestätigt die von Rivin [22] hergeleitete Beziehung, wonach eine verminderte Steifigkeit die Eigenfrequenzen absenkt. Diese beobachtete Absenkung der jeweils niedrigsten Eigenfrequenz bei nachlassender Steifigkeit stimmt auch mit den von Doebeling *et al.* zusammengetragenen Labor- und Feldstudien überein [23]. Eine verlängerte Druckberührzeit tritt typischerweise auf, wenn das Halbzeug großvolumiger ist, die Stößelgeschwindigkeit verlangsamt wird oder die Tischhöhe erhöht wird, sodass der Stößel früher auf das Werkstück aufsetzt und dadurch während der Lastphase einen längeren Weg bis zum unteren Totpunkt zurücklegt.

Gleichzeitig verschieben sich am Pressengestell die nächsthöheren Eigenfrequenzanteile deutlich nach oben. Die erste Eigenfrequenzkomponente steigt mit $\rho = +0,87$, die zweite mit $\rho = +0,83$ und nach Bremsimpuls-Bereinigung sogar mit $\rho = +0,88$. Am Stößel zeigt die entsprechende Frequenz im Rohsignal zwar ebenfalls einen Anstieg ($\rho = +0,86$), kehrt sich nach Anwendung des Fade-Outs jedoch ins Negative ($\rho = -0,62$). Auch hier überlagert der Bremsimpuls die eigentliche Dynamik.

Im Mikrofonkanal sinkt die Luftschall-Bandenergie zwischen 3,0 und 3,2 kHz (faded, $\rho = -0,53$). Ein längerer beziehungsweise weicher verlaufender Schlag erzeugt weniger impulsiven Luftschall in diesem Frequenzfenster.

Wird speziell die Entlastungsdauer betrachtet, verschwinden die positiven Effekte vollständig. Die erste Eigenfrequenz des Stößels fällt deutlich ($\rho = -0,70$), ebenso die erste und zweite Eigenfrequenzkomponente ($\rho = -0,69$ beziehungsweise $-0,62$). Nach Fade-Out bleibt nur noch die zweite Gestellfrequenz signifikant ($\rho = -0,68$). Die tiefsten spektralen Anteile und das

berücksichtigte Luftschall-Band zeigen dabei keine messbare Veränderung.

3.6 Umformenergie

Eine höhere Gesamt-Umformarbeit wirkt sich durchweg dämpfend auf die Eigenfrequenzen der Presse aus. Sowohl am Stößel ($\rho = -0,52$) als auch am Pressengestell ($\rho = -0,52$) fällt die erste Eigenfrequenz, und am Gestell sinkt zusätzlich der zweite Frequenzpeak ($\rho = -0,51$). Nach Entfernung des Bremsimpulses verstärkt sich dieser Trend leicht ($-0,54$ beziehungsweise $-0,55$). Offenbar führt eine hohe plastische Gesamtenergie zur Steifigkeitsabnahme der Struktur, sodass ihre charakteristischen Frequenzen nach unten verschoben werden.

Betrachtet man nur die geleistete Umformarbeit in der Entlastungsphase ergibt sich ein differenziertes Bild. Im Rohsignal steigen zunächst die ersten Eigenfrequenzen beider Sensoren stark an (Stößel: $\rho = +0,80$; Gestell: $\rho = +0,81$) und auch die nächsthöhere Eigenfrequenz des Gestells steigt ($\rho = +0,80$), während die niedrigste Gestell-Frequenz abnimmt ($\rho = -0,57$). Wird der Bremsimpuls ausgeblendet, drehen sich die Trends der jeweils niedrigsten ausgeprägten Eigenfrequenzen ins Negative ($-0,60$ beziehungsweise $-0,71$). Nur die zweite Gestell-Eigenfrequenz bleibt positiv und steigt sogar weiter an ($\rho = +0,86$). Damit zeigt sich, dass während des Abhebens des Werkzeugs bei hoher Entlastungsarbeit die unteren Frequenzanteile gedämpft werden, gleichzeitig die zweite Gestell-Eigenfrequenz intensiver angeregt wird. Ein Muster aus fallenden ersten und steigender zweiter Gestell-Eigenfrequenz kennzeichnet somit eine erhöhte Energieabgabe, während der Bremsimpuls im Rohsignal einen scheinbar gegenteiligen Effekt vortäuscht.

4 Zusammenfassung

Die vorliegende Untersuchung zeigt, dass die synchrone Analyse struktur- und luftgebundener Schwingungssignale das Monitoring warmmassivumformender Prozesse erweitert. Positionsabweichungen des Halbzeugs, Maschinenfehlparametrierungen oder temperaturinduzierte Werkstoffänderungen manifestieren sich als reproduzierbare Verschiebungen charakteristischer Eigenfrequenzen und Bandenergien. Die Gegenüberstellung des Rohspektrums mit dem unter Verwendung eines Tukey-Fensters geglätteten Spektrum zeigt zudem, dass sich Störimpulse eindeutig separieren lassen, sodass vormals als Artefakte eingestufte Signalanteile zu belastbaren Prozessindikatoren avancieren. Die selektive Sensitivität auf Temperatur und Schlagdynamik qualifiziert den Mikrofonkanal als kostengünstige, berührungslose Ergänzung zu der Vibrationsanalyse. Durch seine gerichtete Charakteristik ermöglicht das Mikrophon eine räumliche Zuordnung von Signalereignissen. Zudem bietet es Redundanz bei Ausfall oder Sättigung der Körperschallsignale.

Die aus dem multisensorischen Ansatz resultierende Fülle an Merkmalen prädestiniert das Verfahren für eine datengetriebene, adaptive Schwellenoptimierung, die falsch-positive Detektionen minimiert. Vorarbeiten bestätigen zudem, dass auch Bauteilqualitätsmerkmale wie zum Beispiel die Gratbahnfläche direkt mit Prozessgrößen korreliert werden können [24]. Die Ergebnisse unterstreichen somit das Potenzial datengetriebener Analysen und legen einen weiteren Grundstein für einfache, auf Verfahren des maschinellen Lernens basierende Überwachungssysteme, die

komplexe Prozesszustände und Prozessanomalien detektieren können.

FÖRDERHINWEIS

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Schwerpunktprogramms 2422 zur „Datengetriebenen Prozessmodellierung in der Umformtechnik“ durchgeführt (Projektnr. 520195047), das seit 2023 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wird.

LITERATUR

- [1] He, X.; Welo, T.; Ma, J.: In-process monitoring strategies and methods in metal forming: A selective review. *Journal of Manufacturing Processes* 138 (2025), pp. 100–128, doi.org/10.1016/j.jma.2025.02.011
- [2] Vinogradov, A.: Signatures of Plastic Instabilities and Strain Localization in Acoustic Emission Time-Series. *Metals* 15 (2025) 1, #46, doi.org/10.3390/met15010046
- [3] Chu, T.; Nguyen, T.; Yoo, H. et al.: A review of vibration analysis and its applications. *Heliyon* 10 (2024) 5, e26282, doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26282
- [4] Mohamed, A.; Hassan, M.; M'Saoubi, R. et al.: Tool Condition Monitoring for High-Performance Machining Systems – A Review. *Sensors* (Basel, Switzerland) 22 (2022) 6, #2206, doi.org/10.3390/s22062206
- [5] Gronostajski, Z.; Hawryluk, M.; Kaszuba, M. et al.: Measuring & control systems in industrial die forging processes. *Eksplotacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 51 (2011) 3, pp. 62–69, archive.ein.org.pl/2011-03-09
- [6] Gutierrez, R.; Fang, T.; Mainwaring, R. et al.: Predicting the coefficient of friction in a sliding contact by applying machine learning to acoustic emission data. *Friction* 12 (2024) 6, pp. 1299–1321, doi.org/10.1007/s40544-023-0834-7
- [7] Li, G.; Shang, X.; Sun, L. et al.: Application of audible sound signals in tool wear monitoring: a review. *Journal of Advanced Manufacturing Science and Technology* 5 (1) (2025) 1, #2025003, doi.org/10.51393/j.jamst.2025003
- [8] Hase, A.; Mishina, H.; Wada, M.: Correlation between features of acoustic emission signals and mechanical wear mechanisms. *Wear* 292–293 (2012), pp. 144–150, doi.org/10.1016/j.wear.2012.05.019
- [9] Ubhayaratne, I.; Pereira, M. P.; Xiang, Y. et al.: Audio signal analysis for tool wear monitoring in sheet metal stamping. *Mechanical Systems and Signal Processing* 85 (2017), pp. 809–826, doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.09.014
- [10] Huang, C.-Y.; Dzulfikri, Z.: Stamping Monitoring by Using an Adaptive 1D Convolutional Neural Network. *Sensors* (Basel, Switzerland) 21 (2021) 1, #262, doi.org/10.3390/s21010262
- [11] El-Galy, I.; Behrens, B.-A.: Online Monitoring of Hot Die Forging Processes Using Acoustic Emission (Part I). *Journal of Acoustic Emission* 26 (2008), pp. 208–218, https://www.ndt.net/?id=10896
- [12] Nötzel, R. F.: Echtzeitprognose des Schmiedemaßes an hydraulischen Freiformpressen. Dissertation, Universität Siegen, 2005
- [13] Arnold, D. N.; Santosa, F.; Rosenthal, J. et al.: *Mathematical Systems Theory in Biology, Communications, Computation, and Finance*. New York: Springer 2003, doi.org/10.1007/978-0-387-21696-6
- [14] Jähne, B.: *Digitale Bildverarbeitung*. Heidelberg: Springer 2024, doi.org/10.1007/978-3-662-59510-7
- [15] Piersol, G.P.; Paez, T. L.: *Harris' shock and vibration handbook*. New York: McGraw-Hill 2010
- [16] Roy, T. K.; Morshed, M.: Performance analysis of low pass FIR filters design using Kaiser, Gaussian and Tukey window function methods. 2013 International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE), Dhaka, Bangladesh, 2013, pp. 1–6, doi.org/10.1109/ICAEE.2013.6750294
- [17] Harris, F. J.: On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform. *Proceedings of the IEEE* 66 (1978) 1, pp. 51–83, doi.org/10.1109/PROC.1978.10837
- [18] Saberi, S.; Fischer, J.; Stockinger, M. et al.: Theoretical and experimental investigations of mechanical vibrations of hot hammer forging.

- The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 114 (2021) 9–10, pp. 3037–3045, doi.org/10.1007/s00170-021-07061-y
- [19] Ma, Q.; Wang, K.; Liu, H. et al.: Influence of shaft combined misalignment on vibration and noise characteristics in a marine centrifugal pump. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control* 41 (2022) 4, pp. 1286–1306, doi.org/10.1177/14613484221104627
- [20] Song, H.; Durand, C.; Baudouin, C. et al.: Dynamic modelling and efficiency prediction for forging operations under a screw press. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 134 (2024) 1–2, pp. 645–656, doi.org/10.1007/s00170-024-14145-y
- [21] Mayr, J.; Jedrzejewski, J.; Uhlmann, E. et al.: Thermal issues in machine tools. *CIRP Annals* 61 (2012) 2, pp. 771–791, doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.008
- [22] Rivin, E.: *Stiffness and Damping in Mechanical Design*. Boca Raton: Taylor & Francis Group 1999
- [23] Doebling, S. W.; Farrar, C. R.; Prime, M. B.: A Summary Review of Vibration-Based Damage Identification Methods. *The Shock and Vibration Digest* 30 (1998) 2, pp. 91–105, doi.org/10.3390/vibration6040051
- [24] Glaubitz, C.; Raible, J.; Monke, H. et al.: KI-gestützte Prozessoptimierung in der Massivumformung. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 120 (2025) s1, pp. 257–262, doi.org/10.1515/zwf-2024-0124

Dipl.-Ing. Claudia Glaubitz 
glaubitz@ifum.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Marcel Rothgänger 
m.rothgaenger@ifum.uni-hannover.de

Richard Reder, M.Sc.

Julius Peddinghaus, M.Sc. 

Dr.-Ing. Kai Brunotte 

Leibniz Universität Hannover
Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen IFUM
An der Universität 2, 30823 Garbsen
www.ifum.uni-hannover.de

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)