

Sensorbasierte Zustands- und Positionsüberwachung von Umformwerkzeugen im Bereich der Innenhochdruckumformung – Erste Ergebnisse

Thomas Reuter¹, Pierre Fischer¹, Thomas Frank², Kai Nestler³, Andreas Grundmann¹

¹ICM e.V., Otto-Schmerbach-Straße 19, 09117 Chemnitz, Deutschland

²CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH, Konrad-Zuse-Straße 14, 99099 Erfurt, Deutschland

³KOMITEC electronics GmbH, Albin-Trommler-Straße 2, 08297 Zwönitz, Deutschland

Zusammenfassung

Zustandsüberwachung und vorausschauende Instandhaltung gewinnen in der Produktionsindustrie zunehmend an Bedeutung. Industrielle Condition-Monitoring-Systeme basieren überwiegend auf der Analyse großer Datenmengen, die durch umfangreiche Sensorik an Maschinen und Anlagen erfasst werden. Diese Ansätze ermöglichen zwar eine zuverlässige Überwachung des Anlagenzustands sowie die Ableitung von Verschleißmodellen, erlauben jedoch keine direkte, prozesszyklusbezogene Erfassung der tatsächlichen Werkzeugbelastung. Insbesondere in der Innenhochdruckumformung (IHU), die durch sehr hohe Flächenbelastungen und Schließkräfte von bis zu 50.000 kN gekennzeichnet ist, stellt dies eine zentrale Herausforderung dar. Zur Adressierung dieser Problematik wird ein sensorbasiertes Messkonzept vorgestellt, das die Integration eines Silizium-Dehnungsmessstreifens (Si-DMS) in die Matrize eines IHU-Werkzeugsystems umfasst. Der Sensor ermöglicht eine indirekte Erfassung der Werkzeugbelastung und liefert Rückschlüsse auf die Bauteilumformung. Ergänzend wurde ein Messwertverstärker zur Signalaufbereitung sowie ein Werkzeugpositionierungssystem zur eindeutigen Lokalisierung integriert. Die Validierung des Sensorkonzepts erfolgte anhand der Umformung eines T-Stücks aus dem Werkstoff 1.4301 bei variierenden Umformdrücken zwischen 500 und 2000 bar. Die Auswertung umfasste Prozessgrößen, Sensorsignale sowie geometrische Bauteilmerkmale. Mittels statistischer Analysen und Clusterverfahren konnten eindeutige Zusammenhänge zwischen Sensorsignal und Umformgrad identifiziert werden. Die Ergebnisse zeigen, dass ab einem Umformdruck von 1750 bar ein Ausformungsgrad von 94 % und bei 2000 bar nahezu vollständige Ausformung erreicht wird. Das vorgestellte Sensorkonzept ermöglicht somit eine prozessintegrierte Zustandsüberwachung und bietet Potenzial zur Echtzeitbewertung der Bauteilumformung, zur Optimierung der Prozessführung sowie zur Steigerung der Effizienz und Prozesssicherheit in der IHU.

Keywords: Innenhochdruckumformung (IHU), Umformwerkzeug, Instandhaltung, Silizium-Dehnungsmessstreifen (Si-DMS), Werkzeugmonitoring, Umformsimulation.

Einleitung

Zustandsüberwachung (Condition Monitoring) und vorausschauende Instandhaltung (Predictive Maintenance) stellen in der Produktionsindustrie zunehmend bedeutende Entwicklungs- und Anwendungsfelder dar [1-3]. Industriell eingesetzte Condition-Monitoring-Systeme basieren auf der Analyse umfangreicher Datenmengen, die in der Regel durch die Integration zusätzlicher Sensorik sowie entsprechender Auswerteeinheiten an Maschinen und Anlagen erfasst werden [4]. Die daraus resultierende hohe Sensordichte führt zu großen Datenvolumina, die als Grundlage für eine datengetriebene Modellierung von Produktionssystemen dienen

[2,5,6]. Auf Basis dieser Modelle werden anschließend die Prozessüberwachung sowie die Fehlerdetektion und -diagnose realisiert [2,6,7]. Im Bereich der IHU existieren verschiedene Ansätze, die sich mit dem Qualitätsmanagement, der Prozessüberwachung sowie der vorausschauenden Instandhaltung befassen. Diese Ansätze zielen darauf ab, durch den Einsatz geeigneter Methoden und Technologien eine verbesserte Prozessstabilität, eine frühzeitige Erkennung von Abweichungen sowie eine zustandsorientierte Planung von Instandhaltungsmaßnahmen zu ermöglichen. Dabei kommen insbesondere datenbasierte Verfahren zum Einsatz, die eine kontinuierliche

Analyse relevanter Prozess- und Zustandsgrößen erlauben und somit zur Steigerung der Produktqualität und Anlagenverfügbarkeit beitragen [8-10]. Die Überwachung ist jedoch ausschließlich auf den Anlagenzustand ausgerichtet. Auf Grundlage der erfassten Daten können Muster identifiziert und Modelle abgeleitet werden, die Rückschlüsse auf einen potenziellen Werkzeugverschleiß zulassen. Eine direkte, prozesszyklusbezogene Erfassung bzw. Quantifizierung der tatsächlich auf das Werkzeug wirkenden Belastungen während eines einzelnen Umformvorgangs ist mit derartigen Systemen jedoch nicht möglich [2,4]. Insbesondere bei Werkzeugen, die sehr hohen Flächenbelastungen ausgesetzt sind, wie sie in der IHU mit Schließkräften von bis zu 50.000 kN auftreten, steht derzeit keine hinreichend zuverlässige Sensorik zur Verfügung, um die reale Werkzeugbelastung messtechnisch direkt zu erfassen. Neben der Schließkraft wirken zusätzlich der Wirkmediendruck im Bauteil sowie axiale Vorschubbewegungen des Halbzeugs als maßgebliche Belastungsgrößen auf das Werkzeug [11,12]. Darüber hinaus ist neben der fehlenden direkten Messbarkeit der Werkzeugbeanspruchung auch keine präzise, prozessimmanente Überwachung der Bauteilumformung möglich. Die eingestellten Prozessparameter üben jedoch einen signifikanten Einfluss auf den Werkzeugverschleiß aus. Diese Parameter werden in der Regel mithilfe von FEM-Simulationen bestimmt, müssen jedoch im realen Prozess häufig angepasst werden, da nicht alle relevanten Einflussgrößen hinreichend genau abgebildet werden können [12,13]. Zur Minimierung dieser Unsicherheiten werden die Prozessparameter häufig mit konservativen Sicherheitsaufschlägen ausgelegt, sodass deutlich höhere Werte gewählt werden, als für den eigentlichen Umformvorgang erforderlich wären. Dies führt zu verlängerten Prozesszeiten und bewirkt eine signifikante Reduktion der Effizienz des IHU-Prozesses.

Vor diesem Hintergrund kommt der Prozess- und Zustandsüberwachung während der Bauteilumformung eine zentrale Bedeutung zu. Insbesondere eine Echtzeitüberwachung der Ausformung in Kombination mit der Möglichkeit zur prozessbegleitenden Optimierung sowie zur präzisen Bestimmung der Werkzeugbelastung würde es erlauben, die gewonnenen Daten unmittelbar in die Prozessauslegung und -regelung zu integrieren [11,12]. Dies eröffnet das Potenzial für eine ganzheitliche Digitalisierung des IHU-

Fertigungsprozesses. Daraus ergeben sich insbesondere Vorteile hinsichtlich der frühzeitigen Erkennung und Behebung von Produktionsabweichungen, eines prozesssicheren Werkzeugeinsatzes, einer zustandsorientierten Instandhaltung, einer durchgängigen Qualitätsüberwachung sowie einer Steigerung der Prozesseffizienz [9,14]. Ein möglicher Lösungsansatz wird in diesem Beitrag vorgestellt. Dieser basiert auf einem sensorbasierten Messmodul, das speziell für IHU-Werkzeugsysteme entwickelt wurde und eine präzise Erfassung der Werkzeugbelastung ermöglicht. Dadurch wird ein effektives Werkzeugmonitoring realisiert. Ergänzend wird ein Werkzeugpositionierungssystem integriert, das eine eindeutige und reproduzierbare Bestimmung der Werkzeugposition im Unternehmen sicherstellt.

Theoretische Grundlagen

In den folgenden Abschnitten werden die theoretischen Grundlagen der Instandhaltung, der Innenhochdruckumformung (IHU) sowie der Werkzeugüberwachung erläutert.

Instandhaltung

Die Instandhaltung dient dem Erhalt bzw. der Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit von Maschinen und Anlagen. Hierfür stehen verschiedene Instandhaltungskonzepte zur Verfügung, die in unterschiedliche Klassen unterteilt werden können, darunter reaktive (schadensabhängige), vorbeugende (planmäßige), zustandsorientierte, prädiktive (vorausschauende), aufgeschobene sowie periodische Instandhaltung [15].

Die Zustandsüberwachung bildet dabei die Grundlage zustandsorientierter und prädiktiver Instandhaltungskonzepte. Sie umfasst die kontinuierliche Erfassung und Auswertung von Maschinen- und Prozessparametern zur Beurteilung des aktuellen Anlagenzustands.

Bei der reaktiven Instandhaltung werden keine präventiven Maßnahmen zur Sicherung der Funktionsfähigkeit durchgeführt. Erst beim Auftreten eines Defekts erfolgt eine Instandsetzung, wobei eine möglichst schnelle Wiederherstellung des Betriebs zur Minimierung von Folgekosten angestrebt wird.

Im Gegensatz dazu basiert die prädiktive Instandhaltung auf der fortlaufenden Zustandsüberwachung während des Betriebs. Durch die statistische Auswertung der erfassten Daten können Zustandsprognosen erstellt und optimale Wartungszeitpunkte bestimmt werden, wodurch sich die Lebensdauer von Anlagenkomponenten verlängern lässt [15, 16].

Innenhochdruckumformung (IHU)

Der IHU-Prozess unterscheidet sich von konventionellen Umformverfahren dadurch, dass die Umformkraft nicht durch starre Werkzeuggeometrien, sondern durch ein unter Druck stehendes Wirkmedium erzeugt wird. In den Abbildungen 1 und 2 sind der Prozess am Beispiel der Herstellung eines T-Stücks schematisch dargestellt sowie das IHU-Werkzeug mit dem umgeformten Bauteil abgebildet. Dabei werden Hohlkörper (Halbzeuge), in der Regel gerade oder gebogene Rohre, in ein Umformwerkzeug, bestehend aus Ober- und Untermatrize, eingelegt und anschließend durch eine Presse geschlossen.

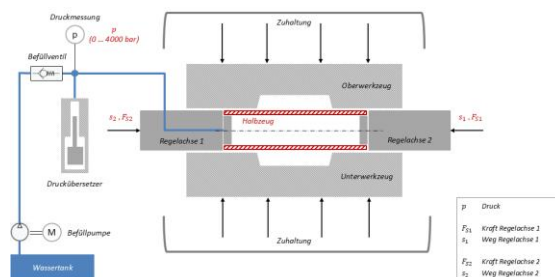


Abb. 1: Funktionsprinzip der IHU am Beispiel eines T-Stücks.

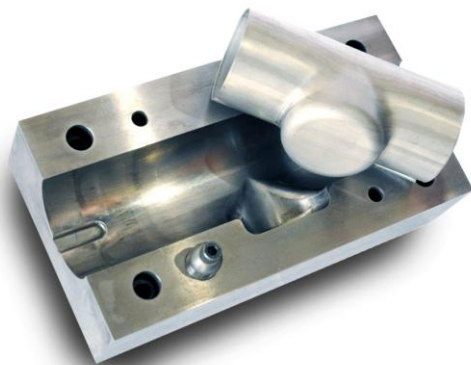


Abb. 2: IHU-Werkzeug mit umgeformtem Bauteil (T-Stück).

Im weiteren Verlauf werden die Enden des Halbzeugs mittels Dichtstempeln abgedichtet und über mindestens eine in den Dichtstempeln integrierte Bohrung mit einem Umformmedium gefüllt. Dieses Medium, üblicherweise eine Wasser- oder Ölemulsion, wird unter hohen Druck gesetzt, sodass eine plastische Verformung des im Werkzeug befindlichen Halbzeugs einsetzt. Zusätzlich wird während des Umformprozesses eine axiale Kraft über die Dichtstempel eingebracht, wodurch das Halbzeug gestaucht und Material gezielt in die Hauptumformzone nachgeführt

wird. Auf diese Weise können hohe Umformgrade bei gleichzeitig weitgehend homogener Wanddickenverteilung realisiert werden [12,13].

Werkzeugüberwachung

In der industriellen Praxis erfolgt die Werkzeugzustandsüberwachung überwiegend indirekt über Maschinen- und Prozessgrößen wie Presskraft-, Druck- oder Wegsignale. Diese ermöglichen jedoch nur eingeschränkte Rückschlüsse auf die lokale Werkzeugbelastung und den tatsächlichen Verschleißzustand. Eine direkte messtechnische Erfassung der im Werkzeug wirkenden Spannungs- und Dehnungszustände ist aufgrund der hohen Belastungen und der eingeschränkten Integrationsmöglichkeiten von Sensorik nur begrenzt realisierbar [11,17]. Zur Erweiterung der Informationsbasis werden daher zunehmend sensorbasierte und modellgestützte Ansätze eingesetzt, bei denen beispielsweise Dehnungsmessstreifen, piezoelektrische Sensoren oder FEM-basierte Simulationen zur Abschätzung nicht direkt messbarer Größen genutzt werden. Insbesondere in der IHU-Forschung werden hybride Ansätze aus Simulation und experimenteller Sensorintegration untersucht, um eine verbesserte Zustandsbewertung des Werkzeugs zu ermöglichen [18,19].

Material und Methoden

In den nachfolgenden Abschnitten werden der experimentelle Versuchsaufbau sowie die Methodik der Versuchsdurchführung, der Umformsimulation und der Datenauswertung detailliert beschrieben.

Experimentelles Setup

Grundlage für die Erfassung der Werkzeugbelastung bildet ein Si-DMS, der als sensorischer Stift ausgeführt und in die Matrize des IHU-Werkzeugsystems integriert wurde (Abbildung 3).



Abb. 3: Sensorstift mit Si-DMS (Fixierung: links geklebt, rechts Glasfritte).

Der Si-DMS zeichnet sich durch eine hohe Empfindlichkeit (k-Faktor 80; $0,4 \text{ mV}/(\text{V} \cdot \text{MPa})$), eine miniaturisierte Bauform sowie eine hohe Langzeitstabilität aus. Er ermöglicht die indirekte Erfassung der im IHU-Werkzeug wirkenden Belastung und liefert damit Rückschlüsse auf die plastische Verformung des Bauteils innerhalb der Matrize, ohne in der direkten Umformzone positioniert zu sein. Der Sensor ist im Bereich der maximalen Umformung, in unmittelbarer Nähe des Radius der Domausbildung, angeordnet (Abbildung 4).

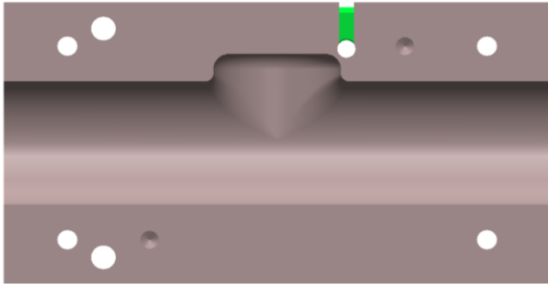


Abb. 4: Umformwerkzeug Obergesenk mit Bohrung (grün) für den Sensorstift.

Zur Signalaufbereitung wurde ein Messwertverstärker entwickelt, der das Sensorsignal erfasst, mittels gezielter Filterung und Differenzverstärkung von Störanteilen bereinigt und zu einem rauscharmen Ausgangssignal verstärkt. Das resultierende DC-Signal wird über eine integrierte M12-Rundsteckverbindung an ein Messdatenerfassungssystem mit AD-Wandler übertragen. Über dieselbe Schnittstelle erfolgt die Spannungsversorgung des Messverstärkers im Bereich von 12–24 V. Das Ausgangssignal des DMS wird als prozentualer Anteil der Referenzspannung von 10 V ausgegeben. Ergänzend ist ein Werkzeugpositionierungssystem integriert, das eine präzise Richtungsbestimmung sowie eine zuverlässige Indoor-Ortung in geschlossenen Produktionsumgebungen ermöglicht. Hierzu sendet das System kontinuierlich Signale an umliegende Antennenplatinen, in denen sowohl Einfallswinkel als auch Entfernung ausgewertet werden. Durch den Einsatz von mindestens drei Antennenplatinen kann mittels Triangulation eine eindeutige Positionsbestimmung des Werkzeugs realisiert werden.

Versuchsdurchführung

Zur Validierung des Sensorkonzepts wurde ein IHU-typisches Bauteil untersucht. Dabei wurde die Ausformung eines T-Stücks mit definierter Geometrie betrachtet. Als Ausgangsmaterial diente ein Halbzeug aus dem Werkstoff 1.4301 mit den Abmessungen $70 \times 2 \times 135 \text{ mm}$. Die

Zielgeometrie bestand aus einer Domausbildung mit einem Plateau-durchmesser von 52,8 mm in Längs- und Querrichtung. Die Umformversuche wurden bei variierenden Umformdrücken im Bereich von 500 bar (keine Umformung) bis 2000 bar (nahezu vollständige Ausformung) durchgeführt. Hierbei wurde eine ausreichende Anzahl an Versuchsproben berücksichtigt ($N = 5$ pro Umformdruck). In Abbildung 5 ist der Versuchsaufbau in der IHU-Anlage dargestellt.



Abb. 5: IHU-Anlage mit integriertem Versuchsaufbau (1 Umformwerkzeug mit Unter- und Obergesenk, 2 Messtechnik, 3 Zugbügel, 4 Hydraulik, 5 T-Stück).

Zur Bewertung der Umformergebnisse wurden die gefertigten Bauteile geometrisch mit dem Atos Q System vermessen (Auflösung 12 MP, Messvolumen $170 \times 130 \times 130 \text{ mm}$). Die ermittelten Geometriedaten wurden anschließend mit den Ergebnissen der Umformsimulation verglichen, um den jeweiligen Umformungsgrad quantitativ zu bestimmen. Auf dieser Grundlage konnte eine Einordnung der Prozesszustände in Abhängigkeit des applizierten Umformdrucks erfolgen.

Umformsimulation

Der Innenhochdruck-Umformprozess wurde mittels numerischer Simulation virtuell abgebildet. Dabei wurde die Werkzeugbewegung unter Annahme ideal starrer, reibungsbehafteter Werkzeuge beschrieben. Auf Basis des empirisch ermittelten Druck - Zeit - Verlaufs sowie geometrischer, tribologischer und werkstoffspezifischer Parameter wurde in einer

ersten idealisierten Simulationsphase das Umformverhalten des Halbzeugs ausschließlich unter Einwirkung des Innendrucks analysiert, wobei axiale Stauchkräfte zunächst nicht berücksichtigt wurden. Zur Reduktion des Rechenaufwands wurden vereinfachte Modellannahmen durch den Einsatz von Halbmodellen getroffen. Als Werkstoff wurde der Edelstahl 1.4301 mit hinterlegter Fließkurve verwendet. Der Werkzeugkontakt wurde durch einen kombinierten Reibwert ($\mu_{\text{Coulomb}} = 0,04$, $\mu_{\text{Schub}} = 0,06$) beschrieben. Zur verbesserten geometrischen Abbildung der Domausbildung erfolgte eine lokale Verfeinerung der Modellauflösung in den relevanten Umformbereichen. Die Parameter maximaler Umformgrad sowie die geometrischen Abmessungen der Domausbildung wurden ausgewertet.

Datenauswertung

Die statistische Auswertung der Prozesskurven, bestehend aus Umformdruck, Nachschiebeweg und Zuhaltekraft, sowie der Sensorsignale und der geometrischen Abmessungen der umgeformten T-Stücke erfolgte mit dem Ziel, Korrelationen zu identifizieren und Cluster zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Sensorsignal und Umformprozess zu bilden.

Ergebnisse und Diskussion

In den Abbildungen 6 bis 8 sind die Ergebnisse der DMS-Messung exemplarisch für einen Umformdruck von 2000 bar den IHU-Prozessparametern (Umformdruck, Zuhaltekraft und Nachschiebeweg) gegenübergestellt. Die Kurvenverläufe zeigen, dass das DMS-Signal den Prozessverlauf eindeutig abbildet und eine klare Korrelation zu den betrachteten Prozessparametern aufweist. Auf dieser Grundlage kann der IHU-Prozess zuverlässig beschrieben und in charakteristische Prozessphasen segmentiert werden. Am Beispiel der T-Stückumformung ergibt sich eine Gliederung in 13 zeitlich aufeinanderfolgende Prozessphasen, die den vollständigen Ablauf von der Werkstückhandhabung über die Umformung bis hin zur Werkzeugöffnung abbilden (Abbildung 9). Dazu zählen das Schließen der Schutztür (1), das Schließen des Werkzeugs (2), das Schwenken des Bügels (3) sowie das Spannen (4) und die Stempelbewegung (5). Im Anschluss erfolgen die prozessrelevanten Umformschritte, beginnend mit dem Vorfüllen (5), gefolgt vom Druckaufbau (6), der Phase des maximalen Drucks (8) sowie dem anschließenden Druckabbau (9). Daraufhin

folgen die Rückfahrt der Stempel (10) und das Entspannen des Systems (11). Abschließend werden der Bügel erneut geschwenkt (12) und das Werkzeug geöffnet (13), womit der Prozesszyklus beendet wird.

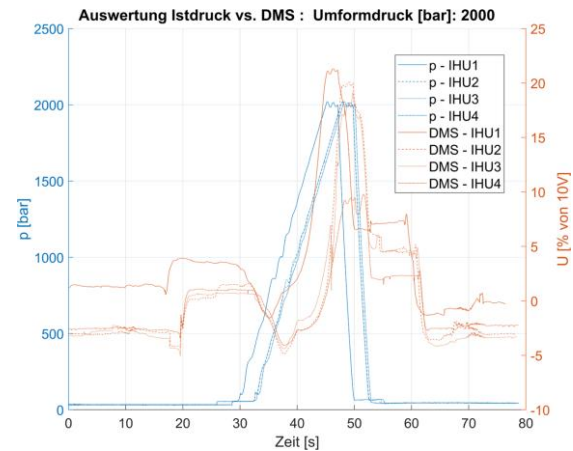


Abb. 6: Vergleich DMS-Signal (rot) mit dem Umformdruckverlauf (blau).

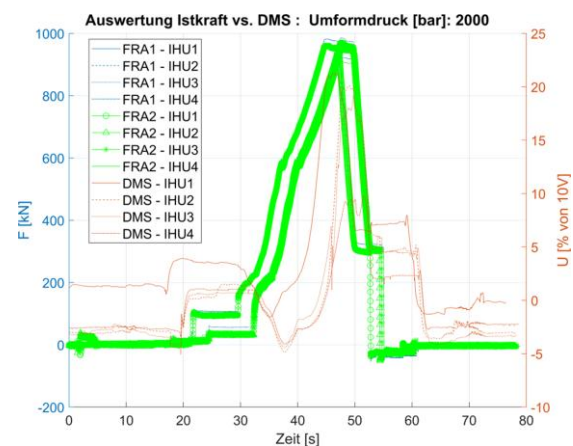


Abb. 7: Vergleich DMS-Signal (rot) mit dem Zuhaltekraftverlauf (grün).

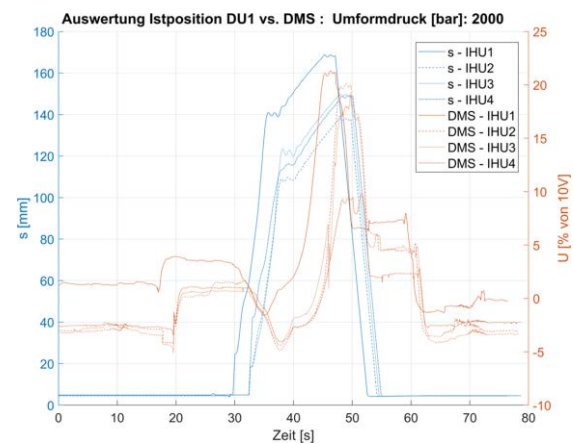


Abb. 8: Vergleich DMS-Signal (rot) mit dem Nachschiebewegverlauf (blau).

Für die Analyse der Werkzeugbelastung und der Bauteilumformung sind insbesondere die Prozessphasen 4 bis 8 von Relevanz.

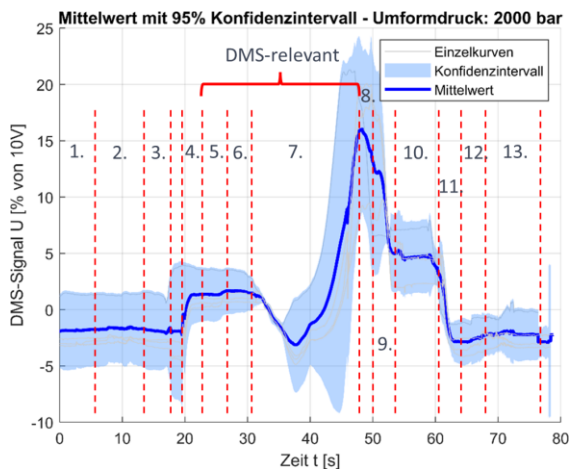


Abb. 9: DMS-Signal (Mittelwert und Konfidenzintervall) bei 2000 bar Umformdruck mit den charakteristischen Prozessphasen.

Der Vergleich der mittleren DMS-Signale in den Prozessphasen 4 bis 8 ist in Abhängigkeit des Umformdrucks im Bereich von 500 bis 2000 bar in Abbildung 10 dargestellt.

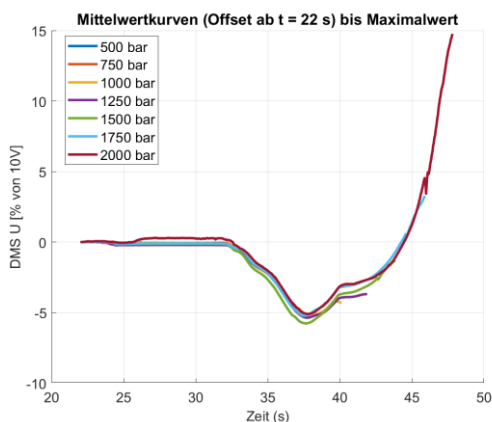


Abb. 10: Vergleich der mittleren DMS-Signale für Umformdrücke im Bereich von 500 bis 2000 bar in den Prozessphasen 4 bis 8.

Der Kurvenverlauf ist für alle untersuchten Umformdrücke grundsätzlich konsistent und zeigt ab dem Ende von Phase 6 einen Abfall des Signals bis zu einem Minimum in der Mitte von Phase 7, gefolgt von einem anschließenden erneuten Anstieg. Die Signalsteigung sowie die Signalthöhe variieren dabei in Abhängigkeit des eingestellten Umformdrucks. Der charakteristische Kurvenverlauf ist auf die Position des SI-DMS zurückzuführen, der ein resultierendes

Summensignal der überlagerten Kraftkomponenten erfasst.

Für die Herstellung eines Bezugs zur Bauteilumformung sind die experimentell ermittelten Domabmessungen sowie die Ergebnisse der Umformsimulation in Tabelle 1 zusammenfassend dargestellt. Die Abweichungen zwischen Experiment und Simulation liegen im Bereich von 4 % (2000 bar) bis 35 % (750 bar). Es ist ersichtlich, dass bei einem Umformdruck von 500 bar keine Bauteilumformung stattfindet, während ab 1750 bar eine Ausformung von über 94 % erreicht wird. In Abbildung 11 ist die Umformsimulation des T-Stücks für einen Umformdruck von 2000 bar dargestellt. Der maximale Umformgrad beträgt in der Simulation zwischen 0,13 (750 bar) und 0,33 (1750 und 2000 bar).

Tab. 1: Experimentelle und simulativ ermittelte Geometriedaten im Dombereich des T-Stücks.

p/ bar	Domabmessung längs [mm]		Domabmessung quer [mm]	
	exp.	sim.	exp.	sim.
500	-	-	-	-
750	29,3	21,1	21,6	13,9
1000	46,7	42,8	39,3	34,8
1250	48,8	47,7	44,2	41,2
1500	52,2	49,8	49,0	45,2
1750	53,8	52,1	52,1	49,3
2000	54,4	52,3	53,3	52,2

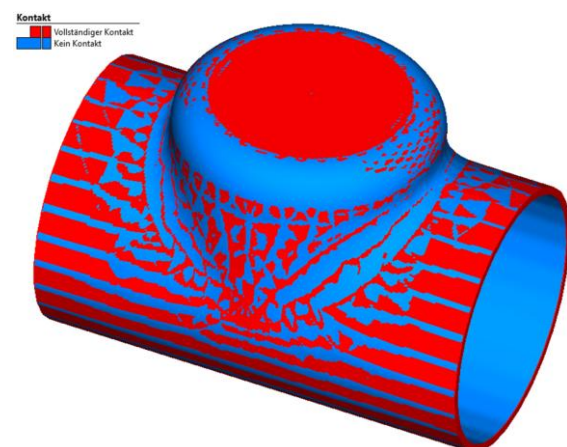


Abb. 11: Umformsimulation bei 2000 bar Umformdruck (Werkzeugkontakt: rot – vollständig, blau – kein Kontakt).

Die Datenanalyse ergab, dass mithilfe der experimentell und simulativ ermittelten Geometriedaten sowie der DMS-Signale Cluster gebildet werden können, die einen eindeutigen Zusammenhang zwischen

Bauteilausformung und Umformdruck aufzeigen (lineare Korrelation mit $R^2 = 0,63$). Als Kennwerte wurden hierbei die Maximal- und Minimalwerte der DMS-Signale verwendet. Die für die Clusterbildung herangezogenen Daten wurden zuvor dimensionslos normiert. In Abbildung 12 ist die Clusterbildung unter den entsprechenden physikalischen Randbedingungen dargestellt.

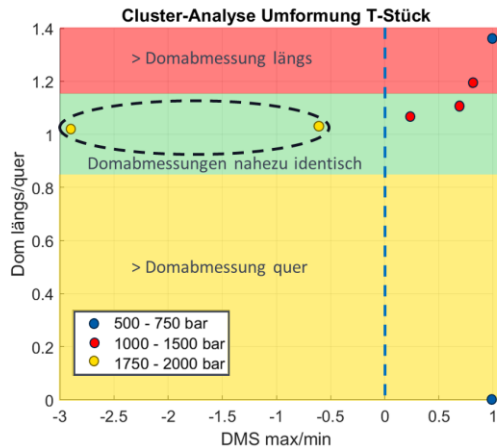


Abb. 12: Clusterbildung in Abhängigkeit von Domabmessung (Längsrichtung zu Querrichtung) und DMS-Signal (maximaler zu minimaler DMS-Signalwert) (schwarze Linie - >94 % ausgeformt, blaue Linie – keine bzw. <85 % Ausformung).

Aus der Clusterbildung wurde eine Kennfelddarstellung abgeleitet. Diese zeigt, dass Bauteile mit nahezu identischen Domabmessungen in Längs- und Querrichtung einem Verhältnis von etwa 1,0 entsprechen (grüner Bereich). Dieser Bereich ist als prozessseitig (nahezu) vollständig ausgeformt zu bewerten, da eine weitgehend homogene Domausbildung vorliegt. Höhere bzw. niedrigere Verhältniswerte weisen hingegen auf eine bevorzugte Ausformung in Längs- bzw. Querrichtung und damit auf eine unzureichende Gesamtformgebung hin (roter bzw. gelber Bereich). Zudem wird ersichtlich, dass unterschiedliche Druckniveaus charakteristische Signal- und Ausformzustände hervorrufen. Im hohen Druckbereich (1750–2000 bar) konzentrieren sich die Messpunkte überwiegend im Bereich nahezu identischer Domabmessungen, was auf eine stabile und reproduzierbare Bauteilausformung schließen lässt; gleichzeitig liegen die DMS-Signalverhältnisse im negativen Max/Min-Bereich (schwarze Linie, Ausformung >94 %). Im mittleren Druckbereich (1000–1500 bar) treten hingegen erhöhte Streuungen auf, die auf Übergangszustände der Ausformung hindeuten. Im niedrigen Druckbereich (500–

750 bar) dominieren deutliche Abweichungen, die auf unvollständige Ausformungen zurückzuführen sind. Sowohl im mittleren als auch im niedrigen Druckbereich liegen die DMS-Signalverhältnisse im positiven Max/Min-Bereich (blaue Linie), was Ausformgrade von unter 85 % kennzeichnet.

Zusammenfassung und Ausblick

Basierend auf den erfassten Messwerten wurde ein systematisches Vorgehen entwickelt, das die Ableitung von Informationen zur Werkzeugverformung im kritischen Bereich, zur Ausformungserkennung sowie zur Bestimmung von Stückzahlen pro Werkzeug ermöglicht. Die Validierungsversuche zeigen eine hohe Wiederholgenauigkeit sowie eine ausgeprägte Sensitivität des entwickelten Sensorkonzepts. Mittels Cluster-Analyse konnten zudem eindeutige Zusammenhänge zwischen Prozessparametern und Sensorsignal identifiziert werden.

Die Ergebnisse belegen, dass ab einem Umformdruck von 1750 bar ein Ausformungsgrad von 94 % erreicht wird, während bei 2000 bar nahezu vollständige Ausformung (99 %) vorliegt. Damit ermöglicht das Sensorkonzept eine unmittelbare Ableitung des Umformgrades aus dem Prozesssignal.

Im Ausblick ist die Durchführung weiterer Versuche mit unterschiedlichen IHU-Bauteilgeometrien vorgesehen, um die Übertragbarkeit des Ansatzes zu erweitern. Darüber hinaus soll zum einen die Sensorpositionierung mithilfe numerischer Umformsimulationen weiter optimiert werden, zum anderen erfolgt eine Untersuchung der DMS-Signale in Abhängigkeit von der Messrichtung (x- bzw. y-Richtung) mit dem Ziel, den Einfluss der einzelnen Kraftkomponenten zu quantifizieren.

Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen wird ein Auswertealgorithmus entwickelt, der eine automatisierte Analyse und anwenderfreundliche Aufbereitung der Messdaten ermöglicht. Dieser soll den Abgleich mit vorgegebenen Kennwerten sowie einen prozessnahen Eingriff bei unvollständiger Ausformung oder Prozessabweichungen unterstützen. Ziel ist zudem die Integration einer automatisierten Fehlererkennung mit Anbindung an übergeordnete Systeme zur gezielten Ausschleusung fehlerhafter Bauteile im Rahmen einer durchgängigen Prozesskette.

Danksagung

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt „Entwicklung eines sensorgestützten

Messmoduls zur Zustands- und Positionsüberwachung für die Integration in ein Umformwerkzeug als Basis für ein effizientes Werkzeugmonitoring“ wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert (Förderkennzeichen 16KN104422) und vom Projektträger VDI/VDE Innovation + Technik GmbH betreut.

Literaturnachweis

- [1] T. Reuter, I. Taraschuk, S. Liebl, C. Luft, T. Modaleck, Entwicklung eines Überwachungs- und Servicemanagementsystems für Sterilisations- und Schredderanlagen: Methodik zur Erarbeitung eines dynamischen Wartungsregimes aus Expertenwissen und Maschinendaten, *ZWF* 117(5), 275–282 (2022); <https://doi.org/10.1515/zwf-2022-1065>
- [2] C. Tsallis, P. Papageorgas, D. Piromalis, R.A. Munteanu, Application-Wise Review of Machine Learning-Based Predictive Maintenance: Trends, Challenges, and Future Directions, *Appl. Sci.* 15, 4898 (2025); <https://doi.org/10.3390/app15094898>
- [3] T. Reuter, J. Schmidt, Á. Pérez, A. Grundmann, Vorausschauende Instandhaltung und Effizienzbewertung von Niederspannungsmotoren: Entwicklung eines universell einsetzbaren Condition-Monitoring-Systems Teil 2: Prozessüberwachung und Effizienzbewertung am Beispiel der mechanischen Glasbearbeitung, *ZWF* 119(9), 624–632 (2024); <https://doi.org/10.1515/zwf-2024-1124>
- [4] T. Reuter, J. Schmidt, A. Grundmann, Entwicklung eines Condition-Monitoring-Systems für Niederspannungsmotoren – Teil 1: Untersuchung von Belastungs- und Schadensfällen mittels Schwingungsmessung, *ZWF* 117(10), 659–666 (2022); <https://doi.org/10.1515/zwf-2022-1139>
- [5] M. Tshilidzi, Condition Monitoring Using Computational Intelligence Methods – Applications in Mechanical and Electrical Systems, Springer-Verlag, London (2012); <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2380-4>
- [6] R. Isermann, Fault-Diagnosis Systems – An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance, 1. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg (2006); <https://doi.org/10.1007/3-540-30368-5>
- [7] M. K. Menon, R. Tuladhar, Asset Management decision-making through data-driven Predictive Maintenance – an overview, techniques, benefits and challenges, *Maintenance, Reliability and Condition Monitoring*, 4(2), (2024); <https://doi.org/10.21595/marc.2024.24232>
- [8] T. Reuter, K. Massalsky, K. Hoyer, G. Ivanov, T. Burkhardt, Qualitätsmanagement und vorausschauende Instandhaltung auf der Basis synthetischer Datensätze: Virtuelle Technologieentwicklung für den Mittelstand am Beispiel der Innenhochdruck-Umformung, *ZWF* 116(10), 673–680 (2021); <https://doi.org/10.1515/zwf-2021-0167>
- [9] T. Reuter, K. Massalsky, T. Burkhardt, Concept Development for Quality Management and Predictive Maintenance in the Area of hydroforming (IHU), In: 29. *Sächsische Fachtagung Umformtechnik*, Technische Universität Dresden, Artikelnummer 25, (2024); <https://doi.org/10.25368/2024.12>
- [10] T. Reuter, K. Massalsky, T. Burkhardt, Fertigungsprozessanalyse eines mittels Innenhochdruck-Umformung hergestellten Bauteils: Anwendung von Data Science für die vorausschauende Instandhaltung und Qualitätssicherung, *ZWF* 119(10), 742–748 (2024); <https://doi.org/10.1515/zwf-2024-1142>
- [11] T. Altan, G. Ngaile, G. Shen, Cold and hot forging: Fundamentals and applications, *ASM International*, (2005); <https://doi.org/10.31399/asm.tb.chffa.9781627083003>
- [12] R. Neugebauer, Hydro-Umformung, VDI-Buch, (2007), Springer, Berlin, Heidelberg; https://doi.org/10.1007/978-3-540-49013-5_2
- [13] M. Koc, T. Altan, An Overall Review of the Tube Hydroforming (THF) Technology, *Journal of Materials Processing Technology* 108, 384–393 (2001); [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00830-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00830-X)
- [14] T. Burkhardt, S. Liebl, K. Massalsky, R. Riedel, N. Göhlert, P. Wilsky, R. Prielipp, Neue Anwendungen für das Innenhochdruckumformen – Mit smarten Konzepten den Marktzugang zum Innenhochdruckumformen für KMU nachhaltig verbessern, *wt Werkstattstechnik online* 108(10), 698–702 (2018); <https://doi.org/10.37544/1436-4980-2018-10-62>
- [15] M. Schenk, Instandhaltung technischer Systeme: Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs, 1. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg (2010); <https://doi.org/10.1007/978-3-642-03949-2>
- [16] G. Pawellek, Integrierte Instandhaltung und Ersatzteillogistik: Vorgehensweisen, Methoden, Tools, 2. Auflage, Springer-Vieweg-Verlag, Wiesbaden (2016); https://doi.org/10.1007/978-3-662-48667-2_4
- [17] G. Byrne, D. Dornfeld, I. Inasaki, G. Ketteler, W. König, R. Teti, Tool condition monitoring (TCM) - The status of research and industrial application, *CIRP Annals*, 44(2), 541–567 (1995); [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60503-4](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60503-4)
- [18] R. Teti, K. Jemielniak, G. O'Donnell, D. Dornfeld, Advanced monitoring of machining operations, *CIRP Annals*, 59(2), 717–739 (2010); <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.05.010>
- [19] M. Papananias, Non-Intrusive Monitoring of Machining Processes for In-Process Product Health Prediction based on Machine Learning, *Procedia CIRP* 138, 346–351 (2026); <https://doi.org/10.1016/j.procir.2026.01.060>