

Titel

Sequential ELeCtromagnetic Forming – SELF

IGF-Nr.: 173 EBR

Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung 1: Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU)
Chemnitz



Ansprechpartner beim Institut:

Dipl.-Ing. M. Linnemann

0371/5397-1335

maik.linnemann@iwu.fraunhofer.de

Danksagungen

Das IGF-Vorhaben 173 EBR der Forschungsvereinigung Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. – FGW, Papenberger Straße 49, 42859 Remscheid wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ausgangssituation

Die wirtschaftliche und automatisierbare Fertigung qualitativ hochwertiger Bauteile in immer größerer Variantenvielfalt und bei geringer Stückzahl stellt eine Herausforderung für die industrielle Fertigung dar. Diese wird durch den zunehmenden Kundenwunsch nach Individualisierung gerade bei designorientierten Produkten immer größer (Alders, 2006).

Speziell im Bereich konventioneller Umformtechniken wie dem Tiefziehen und Streckziehen, erschweren hohe Werkzeugkosten und eine enge Bindung der Werkzeuge an die jeweilige Bauteilgeometrie die Bewältigung dieser Aufgabe. Bereits leichte Variationen bringen hier einen großen Kosten- und Zeitaufwand in der Umsetzung mit sich. Dies betrifft besonders die Fertigung großflächiger Bauteile z.B. aus dem Fahrzeugbau, der Luftfahrt, dem Werkzeugmaschinenbau, dem Energiesektor (z.B. Windradkomponenten), dem Fassadenbau oder dem Werbemittelbereich (z.B. strukturierte Metallschilder). Dementsprechend besteht ein hoher Bedarf an innovativen Fertigungsmethoden, welche dieses neue Anforderungsprofil erfüllen.

Die elektromagnetische Umformung (EMU) bietet hier hohes Potenzial. Sie nutzt die Energiedichte gepulster Magnetfelder, die durch die stoßartige Entladung elektrischer Energie über eine (Werkzeug-)Spule entstehen, um Lorentzkräfte in elektrisch leitfähigen Werkstücken hervorzurufen, die zur Umformung führen (Psyk, et al., 2011). Diese berührungslose Kraftaufbringung ermöglicht es, die gleiche Werkzeugspule flexibel für die Fertigung unterschiedlicher Geometrievarianten einzusetzen. Darüber hinaus gewährleistet sie eine sehr oberflächenschonende Verarbeitung. Neben zahlreichen weiteren Vorteilen zeichnet sich die EMU insbesondere auch dadurch aus, dass viele Werkstoffe bei den verfahrensspezifischen hohen Geschwindigkeiten und Dehnraten eine vergleichsweise große Umformbarkeit aufweisen, was dem Designer einen erweiterten Gestaltungsspielraum eröffnet.

Allerdings werden bei der EMU nur Werkstückbereiche in direkter Nähe der Spulenumwicklung kraftbeaufschlagt, sodass Größe und Geometrie der Spule an die jeweilige Umformaufgabe anzupassen sind. Die Spule ist daher üblicherweise mindestens so groß, wie der umzuformende Werkstückbereich. Mit zunehmender Größe steigen jedoch die benötigte elektrische Energie und Spannung und damit die Belastung aller Maschinen- und Werkzeugkomponenten, sodass die Entwicklung dauerfester Systeme zunehmend komplexer und schließlich unmöglich wird (Dicke, 1968). Daher beschränken sich Anwendungsbeispiele der EMU bislang auf kleine bis mittlere Bauteile bzw. Bauteilbereiche.

Forschungsziel

Die technologisch-wirtschaftliche Prozessgrenze der EMU kann durch sequenzielle elektromagnetische Umformung überwunden werden. Dabei wird zunächst ein kleiner Bauteilbereich elektromagnetisch umgeformt. Dann werden Werkzeugspule und Werkstück relativ zueinander verschoben, sodass ein anderer, ggf. angrenzender, Werkstückbereich umgeformt werden kann. So können mit einer relativ kleinen Spule auch große Bauteile oder Bauteilbereiche sukzessive gefertigt werden und die bekannten Vorteile der EMU gegenüber konventionellen Verfahren werden auch für großflächige Bauteile nutzbar. So kann – im Sinne einer wirtschaftlichen Fertigung bei kleinen Stückzahlen und hoher Variantenvielfalt – dieselbe Werkzeugspule flexibel für die Umformung unterschiedlicher Geometrievarianten eingesetzt werden. Dies erfordert lediglich die Anpassung eines einzigen formgebenden Werkzeuges.

Die prinzipielle Machbarkeit dieses innovativen Ansatzes wurde am Fraunhofer IWU bereits experimentell anhand einer Strukturierungsaufgabe nachgewiesen (Psyk, et al., 2015). Dabei wurden Werkstücke erstmalig in jeweils zwei Umformsequenzen mit Wabenstrukturen versehen. Zum Einsatz kam dabei eine einzige Werkzeugspule, die genutzt wurde, um mithilfe unterschiedlicher formgebender Werkzeuge verschiedener Wabengrößen zu realisieren. Somit konnte sowohl die Machbarkeit der sequenziellen EMU, als auch die Anwendbarkeit einer „Standardspule“ zur Umsetzung verschiedener Umformaufgaben nachgewiesen werden.

Aufbauend darauf wurde nun im Rahmen eines bi-nationalen Forschungsprojektes mit Partnern aus Deutschland und der Tschechischen Republik die industrielle Implementierung der sequenziellen elektromagnetischen Blechumformung vorbereitet. Dazu war eine numerische und experimentelle Analyse der Wechselwirkungen zwischen aufeinanderfolgenden Umformschritten benachbarter Bereiche und deren Einfluss auf die Qualität des Umformergebnisses erforderlich. Diese diente der Ableitung zielgerichteter Umformstrategien, die dann in einem Prozess mit automatisierter Positionierung von Werkstück und Spule umgesetzt wurden. Die Validierung dieses Ansatzes erfolgte schließlich anhand der Fertigung praxisorientierter Formdemonstratoren (Linnemann, et al., 2017).

Darüber hinaus galt es, unter technologischen und wirtschaftlichen Aspekten geeignete Lösungen in Bezug auf Maschinen und Werkzeuge zu entwickeln bzw. anzupassen. Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten bietet unter anderem die Nutzung alternativer Werkstoffe, wie z.B. Holz, Beton, Kunststoff einerseits und konstruktiver Vereinfachungen der formgebenden Werkzeuge andererseits, ein hohes Potenzial. So kann, ähnlich wie bei der inkrementellen Blechumformung mit einem Drückstichel und einer Teilpatrize, die vollflächige Abstützung des Werkstückes durch eine partielle ersetzt werden, sodass die Werkzeugfertigung deutlich schneller und aus kostengünstigeren Halbzeugen möglich ist.

Vorgehensweise und Forschungsergebnisse

Basierend auf den Grundprinzipien der elektromagnetischen und der inkrementellen Umformung wurde ein Werkzeug entwickelt. Es besteht aus einem Spannrahmen, der das Blech relativ zu der daran befestigten Matrize fixiert. Dieser Rahmen sitzt auf zwei orthogonal aufeinander stehenden Linearachsen und ermöglicht somit die Bewegung der Oberkonstruktion. In einem definierten Abstand unterhalb des Blechhalbzeuges befindet sich eine isolierte Kupferspule, über welche die für die Umformung erforderlichen Kräfte auf das Werkstück aufgebracht werden. Bei der Spulendimensionierung ist es wichtig, dass diese ein breites Anwendungsspektrum abdecken kann, um hohe Folgekosten für ein angepasstes Werkzeug zu vermeiden. Dies geht einher mit einem entsprechend kleinem Durchmesser. Limitiert wird der minimale Spulendurchmesser jedoch durch die elektromagnetischen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Windungen.

Zum einen darf der Innendurchmesser nicht zu klein werden, da es dann im Zentrum der Spule zu einem starken Anstieg der wirkenden Kräfte kommt. Hinzu kommt, dass hier zwingend ein Anschluss benötigt wird, welcher den elektrischen Kreis schließt. Dieser wiederum bewirkt eine Inhomogenität, welche in Verbindung mit den zuvor genannten Kräften zu einer Zerstörung durch Deformation aus der Spulenebene heraus führen kann. Zum anderen muss der Abstand zwischen den Windungen groß genug sein, um eine ausreichende Isolation zu gewährleisten und Kurzschlüsse zu verhindern.

Ein weiterer Faktor, welcher insbesondere bei inkrementellen elektromagnetischen Umformvorgängen eine Rolle spielt, ist die Anzahl der Inkremente, welche für die Fertigung eines Bauteiles benötigt werden. Hierbei gilt: je größer die Spule, desto geringer ist die Prozesszeit aufgrund einer verringerten Schrittzahl. Andererseits limitiert gleichzeitig eine universelle Einsatzbarkeit der Spule deren Größe. Um diesem Widerspruch gerecht zu werden, findet hier eine spiralförmige Spule mit einem Durchmesser von 120 mm Anwendung. Die Windungsanzahl beträgt 2,5 bei einer Breite von 10 mm, einem Abstand von 6 mm und einer Höhe von 25 mm.

Als Matrize dient eine Holzform einer, von der Firma „elem industrial design“ entworfenen, Stuhlsitzfläche. Sie besteht aus Buchen-Schichtholz und wurde bereits für eine konventionelle, inkrementelle Fertigung der Sitzfläche genutzt. Grund für die Wahl dieses außergewöhnlichen Werkstoffes sind die geringen Kosten für Material und Fertigung. Damit einhergehend ist jedoch eine Verringerung der Matrizenlebensdauer zu erwarten. Dies zeichnete sich bei der konventionellen Fertigung bereits ab, da an scharfen Kantenradien nach einer kleinen Losgröße eine Vergrößerung dieser Radien festzustellen war. Das Verfahren ist jedoch genau für solche geringen Losgrößen konzipiert, wodurch sich hieraus keine signifikanten Nachteile ergeben.

Anhand des Anwendungsbeispiels aus der Möbelindustrie wurden numerische und experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um die technologische Machbarkeit des Verfahrens nachzuweisen. Die numerischen Betrachtungen wurden mit einer

gekoppelten Simulation in LS-DYNA durchgeführt. Dadurch ist es möglich die Wechselwirkungen zwischen dem elektromagnetischen und dem strukturellen Feld genau zu berücksichtigen. Die experimentelle Verifikation der numerischen Ergebnisse erfolgte durch Umformung der Aluminiumhalbzeuge mit den gleichen Parametern. Es ergab sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den numerischen Betrachtungen und der experimentellen Untersuchung. Dies zeigt, dass eine simulative Auslegung von Werkzeugen und des Prozesses, möglich ist, wodurch erhöhte Kosten für Werkzeuganpassungen oder Neukonstruktionen verhindert werden können.

Da die numerische Simulation, aufgrund der Kopplung und der Randbedingungen, sehr zeitaufwändig ist, bietet sich für die weiteren Untersuchungen eine experimentelle Parametervariation zur Verbesserung des Umformergebnisses an. Hier hat sich gezeigt, dass hohe Energien deutliche Abdrücke der Spulenwindungen auf dem Halbzeug verursachen, die sich in folgenden Umformschritten nicht ohne weiteres wieder einebnen lassen. Im Gegensatz dazu lassen sich für niedrigere Energien wesentlich gleichmäßigere Ergebnisse erzielen. Dies hängt damit zusammen, dass die magnetische Feldstärke und damit die wirksamen Kräfte unterhalb der Spulenwindungen höher sind als im isolierten Zwischenraum zwischen zwei benachbarten Windungen.

Ebenso hat die Relativverschiebung von Werkzeugspule und Bauteil zwischen zwei benachbarten Umformschritten einen Einfluss auf das erzielbare Umformergebnis. Bei großen Relativverschiebungen kommt es zu einer klar erkennbaren Welligkeit im Randbereich der Inkremente. Der Grund dafür ist, dass sich das Magnetfeld nur innerhalb einer begrenzten Wirkzone unterhalb der Spiralspule ausbildet. Bedingt durch die geometrische Form, entsteht so eine wirkfreie Zone zwischen den einzelnen Inkrementen in der keine signifikante Umformung erfolgt. Diese fällt bei kleineren Verschiebungen deutlich geringer aus, wodurch die Welligkeit zurückgeht.

Mit den gewonnenen Erkenntnissen wurde im nächsten Schritt ein auf die Bauteilgeometrie angepasste Umformstrategie angewendet. Als Resultat ist ein Bauteil entstanden, bei welchem eine sehr gute Ausformung erreicht wurde. Es tritt keinerlei Falten- oder Wellenbildung mehr auf. Damit wird deutlich, dass die Kombination aus inkrementeller und elektromagnetischer Umformung gut geeignet ist, um Bauteile in kleinen Losgrößen zu fertigen. In Bereichen höherer Umformtiefen kam es jedoch zu einer nicht ausreichenden Ausformung des Bauteils. Ein Grund dafür liegt im aktuellen Versuchsstandskonzept, bei welchem die Matrize nur zweiachsig in der Blechebene verfahren werden kann. Es kann davon ausgegangen werden, dass dieses Verhalten durch Verschieben der Spule senkrecht zur Blechebene verhindert werden kann.

Zusammenfassung

Ausgehend von den Grundlagen der kombinierten Prozesse wurde ein Werkzeugkonzept entwickelt, das die Anforderungen an die "aktiven" und die formgebenden Werkzeuge (Matrize oder Patrize) definiert. Darüber hinaus beinhaltet das Werkzeugkonzept auch ein System zur automatisierten Positionierung und Relativbewegung zwischen dem Werkstück und den "aktiven" und formgebenden Werkzeugen. Mit Hilfe dieses Aufbaus wurden eine einfache Geometrie auf ihre Umsetzbarkeit und die notwendige Prozessgrößen hin untersucht. Es konnten erste Eindrücke über den Einfluss der Prozessparameter gesammelt und im Zuge eines Machbarkeitsnachweises auf ein optimal auszuformendes Bauteil angewendet werden. Somit wurde gezeigt, dass die Kombination aus inkrementeller und elektromagnetischer Umformung gut geeignet ist, um großflächige Bauteile mit geringen Stückzahlen zu fertigen. Dennoch Bedarf es für ein ganzheitliches Prozessverständnis noch weiteren grundlegenden Analysen des Umformverhaltens.

Ein besonderer Dank gilt allen Mitgliedern im projektbegleitenden Ausschuss für die gute Zusammenarbeit und für die Unterstützung bei der Durchführung der Forschungsarbeiten.

Eine Langfassung der Forschungsarbeiten kann in Form eines Schlussberichts bei der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V., Papenberger Str. 49, 42859 Remscheid, www.fgw.de, angefordert werden.

Weiter Informationen erhalten Sie bei Herrn Dipl.-Ing. M. Linnemann unter 0371/5397-1335

Literatur:

- Alders, K. (2006). Komplexitäts- und Variantenmanagement der AUDI AG. In U. Lindemann, R. Reichwald, & M. F. Zäh, *Individualisierte Produkte - Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion* (S. 221ff). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Dicke, W. (1968). *Zur Berechnung von optimalen Werkzeugen für das elektromagnetische Umformen*. Hannover: Universität Hannover.
- Linnemann, M., Scheffler, C., Kurka, P., Psyk, V., & Landgrebe, D. (18. 08 2017). Inkrementelle, elektromagnetische Umformung - Numerische und experimentelle Prozessanalyse. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF*, 112(7-8).
- Psyk, V., Kurka, P., Kimme, S., Werner, M., Landgrebe, D., Ebert, A., et al. (2015). Optimisation of Component Performance via Structuring. *4th International Conference on New Forming Technology - ICNFT 2015, MATEC Web of Conference 21*. Glasgow.
- Psyk, V., Risch, D., Kinsey, B. L., Tekkaya, A. E., & Kleiner, M. (2011). Electromagnetic Forming - A Review. *Journal of Materials Processing Technology*(211), pp. 787 - 829.