



Fraunhofer
IWU

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR WERKZEUGMASCHINEN UND UMFORMTECHNIK IWU

ELEKTROMAGNETISCHE UMFORMUNG



BERÜHRUNGSLÖS UND SCHNELL

Elektromagnetische Umformung (EMU) ist ein Hochgeschwindigkeitsumformverfahren, mit dem blech- und profilmörmige Werkstücke aus elektrisch leitfähigen Werkstoffen sowohl umgeformt als auch umformtechnisch gefügt und getrennt werden können.

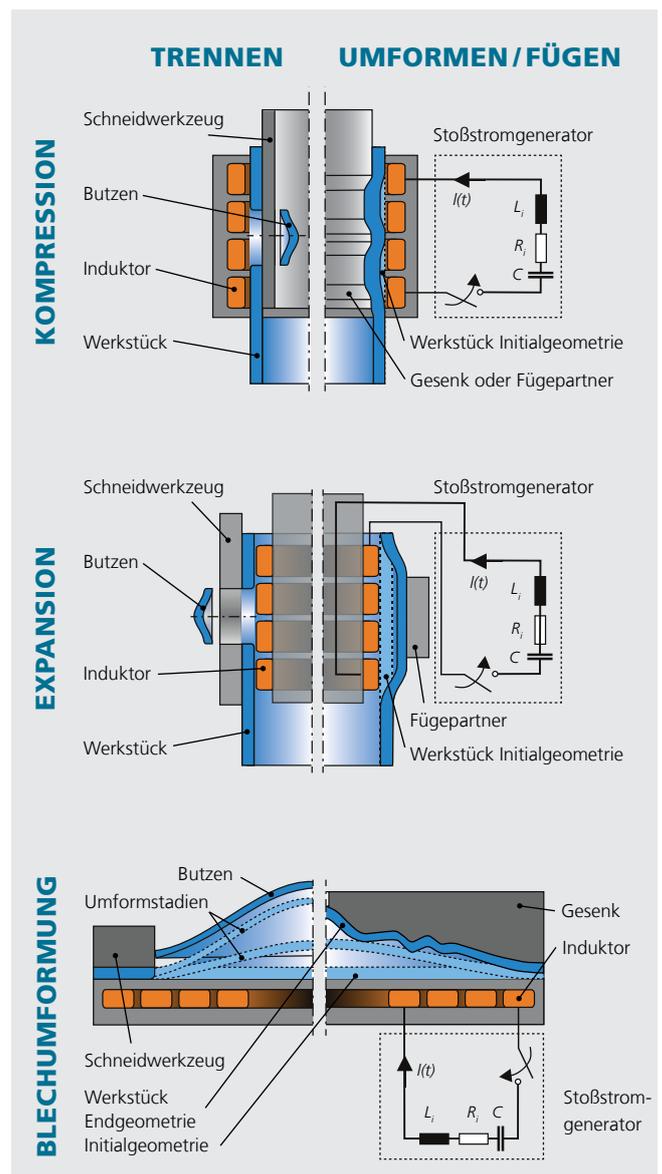
Bei der EMU erfolgt die Kräfteinleitung über die Energiedichte gepulster Magnetfelder. Dies erfordert keinen mechanischen Kontakt zwischen Werkzeug (Induktor) und Werkstück. Infolge der Kräfteinwirkung werden die Werkstücke kurzzeitig auf Geschwindigkeiten von bis zu mehreren Hundert Metern pro Sekunde beschleunigt und erreichen Dehnraten von bis zu $10\,000\text{ s}^{-1}$. Der Umform-, Füge- oder Trennprozess ist typischerweise innerhalb von einigen zehn bis ein- oder zweihundert Mikrosekunden abgeschlossen.

Der Aufbau für die EMU besteht aus einer Umformanlage (Stoßstromgenerator), dem Induktor (gegebenenfalls inklusive eines Feldformers), dem Werkstück und anwendungsabhängiger weiterer Werkzeugkomponenten wie Schneidwerkzeugen, formgebenden Matrizen oder Fügepartnern. In Abhängigkeit von Geometrie und Anordnung von Werkstück und Werkzeug lassen sich folgende drei Verfahrensvarianten unterscheiden:

- elektromagnetische Kompression von Rohren und Hohlprofilen mithilfe eines das Werkstück umgebenden Induktors,
- elektromagnetische Expansion von Rohren und Hohlprofilen mithilfe eines im Werkstück positionierten Induktors und
- elektromagnetische Blechumformung, bei der ein Induktor in direkter Nähe des ebenen Blechhalbzugs oder eines vorgeformten Bauteils positioniert wird.

Unabhängig vom Aufbau wird der Prozess durch das Laden und anschließende Entladen des Kondensators des Stoßstromgenerators gestartet. Dadurch fließt ein gedämpfter sinusförmiger Stromimpuls durch den Induktor. Dieser zeitabhängige Strom induziert ein entsprechendes Magnetfeld. Befindet sich ein elektrisch leitfähiges Werkstück in der direkten Nähe des Induktors, wird hier ein dem Induktorstrom entgegengesetzter Strom induziert. Dieser schirmt das Magnetfeld ab, sodass die Feldstärke im Spalt zwischen Werkstück und Induktor deutlich höher ist als auf der induktorabgewandten Werkstückseite. Die im Magnetfeld gespeicherte Energiedichte kann als magnetischer Druck betrachtet werden, der Maximalwerte von bis zu einigen Hundert Megapascal erreichen kann und zur Beschleunigung und Umformung des Werkstücks führt.

Dabei ist die Bewegungsrichtung stets vom Induktor weg gerichtet. Abhängig von den eingesetzten Werkzeugkomponenten und deren Interaktion mit dem Werkstück lassen sich Umform-, Trenn und Fügeoperationen unterscheiden. Es sind auch Kombinationen dieser Anwendungen innerhalb ein- und desselben Bauteils und Prozessschritts möglich.





FORSCHUNGSSCHWERPUNKTE UND KERNKOMPETENZEN

Wir bieten unseren Kunden auf dem Gebiet der elektromagnetischen Umformung ganzheitliche Lösungsstrategien für fertigungstechnische Fragestellungen. Diese beinhalten

- die Prozess- und Technologieentwicklung,
- die Werkzeugentwicklung und
- die Produktentwicklung.

Die ganzheitliche Betrachtungsweise ist bei der EMU unverzichtbar, da die wirksamen Lasten, d.h. die temporäre und lokale Verteilung von Strom, Magnetfeld und magnetischem Druck, und die daraus resultierende Werkstückbewegung sowohl von den gewählten Prozessparametern und den Eigenschaften der Maschinen und Werkzeuge als auch von den Parametern des Werkstücks selbst abhängen.

Prozess- und Technologieentwicklung

Dieser Bereich umfasst die Durchführung numerischer und experimenteller Machbarkeitsstudien, Prozessanalysen und Prozessauslegungen für formgebende, fügende und trennende Fertigungsoperationen. Neben dem reinen EMU-Prozess betrachten wir auch Verfahrensintegrationen und Prozessketten, welche die EMU mit konventionellen Umformverfahren kombinieren. Eine geschickte Prozessauswahl vorausgesetzt, ergänzen sich die jeweiligen Verfahrensvorteile komplementär. So erweiterte Formgebungsgrenzen ermöglichen die Fertigung von Bauteilen, die mit einem Einzelprozess nicht herstellbar sind.

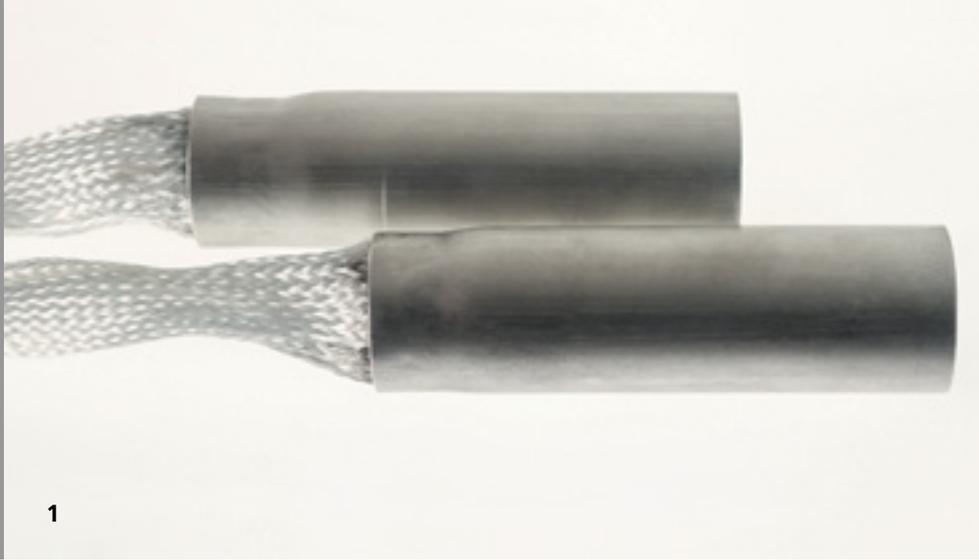
Im Gegensatz zu konventionellen Umformverfahren müssen bei der EMU neben typischen mechanischen Prozessgrößen auch elektromagnetische und gegebenenfalls thermische Parameter sowie die Wechselwirkungen dieser Feldgrößen untereinander berücksichtigt werden. So ruft beispielsweise der aus der Verteilung des Magnetfeldes resultierende magnetische Druck die Umformung hervor, während gleichzeitig durch die Geometrie-

änderung Einfluss auf die Magnetfeldverteilung genommen wird. Darüber hinaus wird die Erwärmung von Werkstück und Werkzeug durch Ohmsche Verluste beeinflusst, während sich die Temperaturverteilung auf die elektrische Leitfähigkeit und damit auf die Stromverteilung auswirkt. Aus mechanischer Sicht wird die Temperaturverteilung durch die Umformwärme mitbestimmt und hat signifikanten Einfluss auf die Fließspannung und damit die Deformation.

Werkzeugentwicklung

Das Fraunhofer IWU verfügt über eine umfassende Expertise in der anwendungsspezifischen Gestaltung und Auslegung von Induktoren, Feldformern und weiteren Werkzeugkomponenten, wie zum Beispiel formgebenden Matrizen, unter mechanischen, elektrischen und elektromagnetischen Gesichtspunkten. Bei der Auslegung von Verfahrenskombinationen und integrierten EMU-Prozessen sind auch die Anforderungen aller weiteren beteiligten Technologien an die Werkzeuge zu berücksichtigen. So ist die Integration eines Induktors in ein Tiefziehwerkzeug möglich. Dies stellt jedoch sehr viel höhere Anforderungen an die Verschleißfestigkeit der Induktoroberfläche, über die das Blechwerkstück nun auch tiefgezogen wird.

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt des Fraunhofer IWU liegt in der Entwicklung und Verfügbarmachung allgemeingültiger Designstrategien zur Werkzeuggestaltung und -fertigung. Wir sind Projektpartner in einem von der Europäischen Union im CORNET-Programm geförderten Projekt, in dem Simulationsstrategien als Werkzeug im Spulenauslegungsprozess entwickelt und Entscheidungskriterien in Bezug auf die Gestaltung der Induktorwindung, die Werkstoffauswahl, die Isolations- und Armierungsstrategie, etc. identifiziert werden. Die Auslegungsmethodik wird dem Anwender in Ablaufdiagrammen und Richtlinien zur Konstruktion und Fertigung von Werkzeugen bereitgestellt.



1

Produktentwicklung

Der Bereich der Produktentwicklung umfasst die Anpassung der Bauteilgeometrie und/oder des eingesetzten Werkstoffs im Rahmen der durch die Aufgabenstellung definierten Grenzen mit dem Ziel

- die Bauteilperformance zum Beispiel im Hinblick auf die Steifigkeit oder andere anwendungsrelevante Aspekte zu optimieren und dabei
- die verfahrensspezifischen Vorteile der EMU-Technologie möglichst gut nutzbar zu machen.

So lassen sich durch lokale EMU unter anderem individuell gestaltete funktionsangepasste Strukturen einbringen. Dadurch können die Bauteileigenschaften in Bezug auf Gewicht und akustisches Verhalten optimiert werden. Beispielsweise kann durch die Einbringung solcher Strukturierungselemente die Bauteilsteifigkeit erhöht werden, sodass – eine hinreichende Festigkeit des Werkstoffs vorausgesetzt – eine deutliche Verringerung der Wandstärke möglich ist. Gleichzeitig kann eine Verbesserung der akustischen Bauteileigenschaften erzielt werden, da die Eigenfrequenz der modifizierten Struktur häufig höher ist als die einer konventionell gestalteten.

Ein weiterer wesentlicher Punkt der Bauteilentwicklung betrifft die Gestaltung der Fügstellengeometrie beim Fügen durch EMU unter Berücksichtigung

- der zu verbindenden Werkstoffe,
- des von der Fügestelle zu übertragenden Lastprofils (Zug- bzw. Druckkräfte, Torsionsmomente) und
- weiterer von der Fügestelle zu erfüllender Anforderungen (zum Beispiel Dichtheit und Optik).

Dazu gehört nicht nur die Dimensionierung der globalen Abmessungen der Fügepartner und damit des Fügespiels, sondern auch die Auslegung von Form, Größe und Anordnung von Nebenformelementen wie zum Beispiel Nuten oder Sicken sowie konischer Absätze in diesem Bereich.

ANWENDUNGSFELDER

Die EMU-Technologie lässt sich grundsätzlich in allen fünf Hauptgruppen der Fertigungstechnik (nach DIN 8580) anwenden. Die Forschungsarbeiten des Fraunhofer IWU fokussieren speziell auf die Bereiche Umformen, Fügen und Trennen.

Umformen

Bei reinen Umformaufgaben kommen häufig blechförmige Halbzeuge zum Einsatz. Dabei ist ein weites Spektrum von Ziehtiefen – von weniger als einem Millimeter im Fall von Kalibrier- oder Prägeaufgaben bis hin zu einigen zehn Millimetern – erreichbar. In der Regel sind Blechumform- und Expansionsprozesse durch das Auftreten von Materialversagen in Form von Einschnürungen und Rissbildung begrenzt, während bei der Kompression die Faltenbildung eine limitierende Größe darstellt. Die Gründe dafür liegen in den hohen Geschwindigkeiten, die ein Nachfließen des Werkstoffs in die Umformzone nicht bzw. nur sehr begrenzt ermöglichen. Der Werkstoff fließt im Wesentlichen aus der Blechdicke, so dass Oberflächenzunahmen, wie sie bei der Expansion und der Blechumformung auftreten, durch eine Verringerung der Wandstärke kompensiert werden und umgekehrt.

Die EMU-Technologie als Einzelprozess ist prädestiniert für die Umformung kleiner bis mittlerer Bauteilgrößen. Bei großen Bauteilen, wie Komponenten von Automobilkarosserien, kann sie vorteilhaft mit konventionellen Umformoperationen, wie Tiefziehen, kombiniert werden. So können unter anderem lokale Details, wie Griff- oder Kennzeichenmulden, geformt werden.

Durch eine solche Verfahrensintegration ist es unter Umständen auch möglich, mehrere ähnliche Bauteilgeometrien mit einem Werkzeugsatz zu fertigen. Für unterschiedliche Details lassen sich matrizenseitig auswechselbare Werkzeugeinsätze verwenden. Der eingesetzte Induktor ist aufgrund der berührungslosen Kraftaufbringung weniger stark an die Bauteil-



geometrie gebunden als konventionelle Umformwerkzeuge. Er muss – ähnliche Abmessungen der zur formenden Mulde vorausgesetzt – nicht zwingend gewechselt werden. Für die gezielte Ausformung definierter Geometrien wurden am Fraunhofer IWU verschiedene Strategien untersucht. Im Fokus standen dabei sowohl Einzelentladungen als auch Prozesse mit mehreren aufeinanderfolgenden gestuften Entladungen.

Fügen durch EMU

Mithilfe der EMU können sowohl gleichartige als auch verschiedenartige Werkstoffkombinationen

- kraftschlüssig durch eine elastisch-plastische Verspannung der zu fügenden Komponenten,
- formschlüssig durch die Ausbildung von Hinterschnitten oder
- stoffschlüssig durch eine Kaltverschweißung miteinander verbunden werden.

Wenngleich das Fügen von Profilen das Hauptanwendungsgebiet der EMU ist, steigt das Interesse am stoffschlüssigen Fügen von Blechen stetig. Unabhängig von der Halbzeuggeometrie ist die gute elektrische Leitfähigkeit des umzuformenden Fügepartners eine wesentliche Voraussetzung für das Fügen durch EMU. Beim Profilfügen ist dies oft der äußere Fügepartner.

Wir beraten Sie bei der Auswahl des geeignetsten Fügemechanismus für einen spezifischen Anwendungsfall in Abhängigkeit von den Halbzeugeigenschaften und den an den Verbund zu stellenden Anforderungen. So kann zum Beispiel eine Metall-Nichtmetall-Verbindung kraft- oder form-, aber nicht stoffschlüssig realisiert werden.

Kraftschlüssige Verbindungen sind vor allem für Werkstoffe mit geringem Umformvermögen geeignet, da der erforderliche Umformgrad gering ist. Der Reinigungsaufwand ist jedoch höher als bei form- und stoffschlüssigen Verbunden und hohe Verbundfestigkeiten sind häufig nur für größere Fügeflächen umsetzbar. Formschlüssige Verbindungen lassen sich durch eine entsprechende Gestaltung der Nebenformelemente

besonders gut an den jeweiligen Lastfall anpassen. Wie bei kraftschlüssigen Verbindungen ist jedoch auch hier eine dichte Verbindung oft nur mit einem zusätzlichen Dichtungselement erreichbar. Stoffschlüssig gefügte Verbunde zeichnen sich durch hohe Festigkeit und Dichtheit aus, benötigen aber einen höheren Energieeintrag in die Verbindung und sind nicht für alle Werkstoffkombinationen möglich.

Fügestelle und Prozess sind in Abhängigkeit vom gewählten Fügemechanismus auszulegen. Dazu verfügt das Fraunhofer IWU über geeignete numerische Methoden und Werkzeuge sowie die entsprechenden Versuchseinrichtungen zur experimentellen Verifikation.

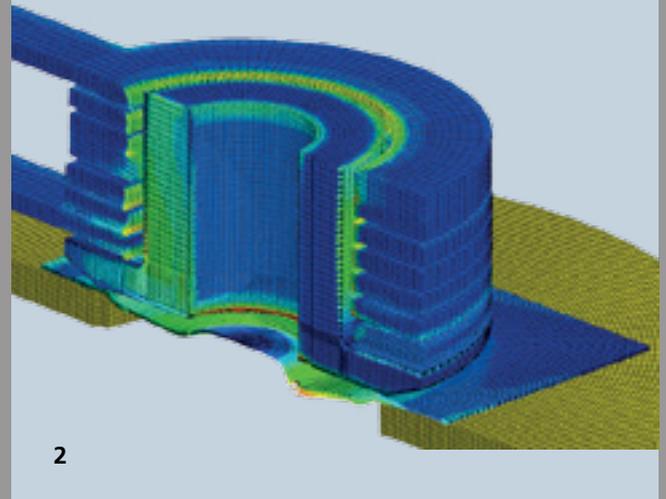
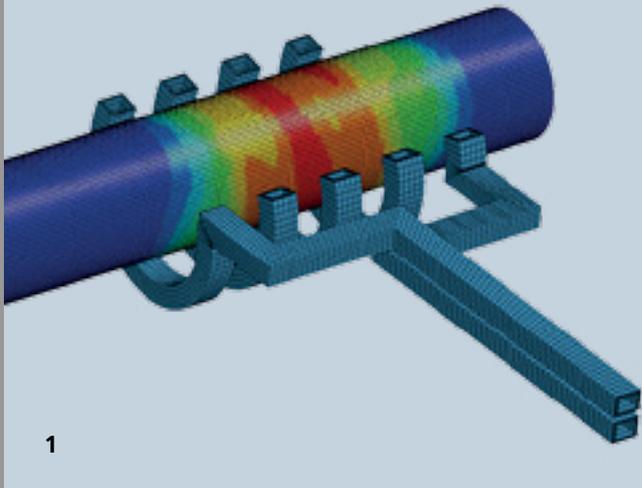
Trennen durch EMU

Im Gegensatz zu konventionellen Trennverfahren wird das Werkstück beim Trennen durch EMU nicht zwischen zwei mechanischen Werkzeugen abgeschert. Stattdessen wird eine Hälfte des konventionellen Schneidwerkzeugs durch den Induktor ersetzt, der das Werkstück stark beschleunigt, sodass es zunächst zu einer Umformung und schließlich, durch die Wechselwirkung mit dem verbleibenden Schneidwerkzeug, zur erwünschten Materialtrennung kommt. Infolge dieses speziellen Prozessablaufs weist die Schnittkante typischerweise induktorseitig einen relativ hohen Kanteneinzug, jedoch keine nennenswerte Gratbildung auf und es kommt nicht zur Flitterbildung. Je nach Anwendungsfall können mehrere Ausschnitte in einem einzigen Entladungsprozess und auch in Kombination mit einer gezielten Formgebung des Werkstücks erfolgen.

Die qualitative und quantitative Ermittlung von Prozessgrenzen und Wechselwirkungen zwischen benachbarten Ausschnitten sind Gegenstand von Forschungsarbeiten am Fraunhofer IWU.

1 *EMU-gefügter Aluminium-Glasfaser-Verbund*

2 *EMU-gefügte Multimaterial-Verbindungen*



NUMERISCHE SIMULATION

Aufgrund der starken Wechselwirkungen zwischen den elektrischen und mechanischen Feldgrößen ist eine dreidimensionale gekoppelte elektromagnetische und strukturmechanische Simulation die exakteste Methode zur Berechnung der elektromagnetischen Umformung. Idealerweise werden dabei auch die Parameter des Stoßstromgenerators durch eine integrierte Analyse des elektrischen Schwingkreises berücksichtigt.

Am Fraunhofer IWU steht mit LS-DYNA 980 beta ein geeignetes Simulationswerkzeug auf einem Cluster für wissenschaftliche Untersuchungen zur Verfügung. Da die Rechenzeiten für größere Modelle relativ lang sind, ist dieses Werkzeug für umfassende Parameterstudien im Rahmen von Werkzeug- und Prozessauslegungen nur bedingt geeignet. Aus diesem Grund beschäftigen wir uns mit der Entwicklung vereinfachter Simulationsstrategien mit ANSYS und FEMM. Diese umfassen Modellvereinfachungen und entkoppelte Betrachtungsweisen der elektromagnetischen und mechanischen Probleme für Vorauslegungen.

In diesem Zusammenhang besteht am Institut auch die Möglichkeit, den EMU-Prozess als Teil einer Prozesskombination bzw. Prozesskette zu modellieren. So wurde im Rahmen der Auslegung eines Fügeprozesses zunächst die Ausbildung des formschlüssig ausgelegten Verbundes mithilfe der gekoppelten Simulation berechnet. Im Anschluss erfolgte unter Berücksichtigung des Einflusses der EMU auf die Werkstoffeigenschaften die Simulation der Verbunddeformation bis hin zur Zerstörung infolge einer Belastung der Fügestelle mit einem Torsionsmoment. Diese Deformation unter Last kann im Sinne einer Prozesskettensimulation als nachfolgender Umformprozess interpretiert werden. Die Abweichung von experimentell und numerisch ermittelten Daten in Bezug auf die übertragbaren Torsionsmomente betrug in diesen Untersuchungen weniger als acht Prozent.

Im Hinblick auf die Auslegung stoffschlüssiger Verbindungen können mithilfe der Simulation Kollisionsparameter, speziell die Aufprallgeschwindigkeit und der Kontaktdruck, bestimmt werden. Die Bewertung dieser Parameter hinsichtlich der Eignung zur Ausbildung eines Stoffschlusses ist anschließend auf Basis von Expertenwissen oder Literaturwerten möglich. Die Simulation von Trennoperationen kann durch eine Bewertung der auftretenden Dehnungen beziehungsweise durch die Berücksichtigung typischer Versagenskriterien direkt auf Basis der Ergebnisse der gekoppelten Simulation mithilfe des Special-Purpose-Simulationswerkzeuges von LS-DYNA erfolgen. Alternativ besteht die Möglichkeit, den Trennprozess auch als entkoppelten Vorgang unter Nutzung konventioneller Simulationswerkzeuge zu berechnen. Die dabei mithilfe der gekoppelten Rechnung bestimmten wirksamen Kräfte dienen als Eingangsdaten.

Die Berechnung der thermischen Feldgrößen, zum Beispiel der Temperaturverteilung, kann über den impliziten thermischen Solver in LS-DYNA ebenfalls gekoppelt mit der elektromagnetischen und strukturmechanischen Simulation erfolgen. Durch die Kopplung des elektromagnetischen und thermischen Solvers ist auch eine Simulation der gezielten induktiven Erwärmung von Bauteilen möglich. Diese kann genutzt werden, um eine optimale Auslegung der Induktionsspulen zu erreichen oder um die notwendige Erwärmungsdauer und Temperaturverteilung durch die Wirbelströme zu berechnen. Diese Untersuchungen sind auch in Zusammenhang mit anderen Anwendungen wie beispielsweise dem Presshärten oder der wirkmedienbasierten Warmumformung von Blechen und Profilen nutzbar. Beide Verfahren sind ebenfalls Forschungsschwerpunkte des Fraunhofer IWU im Bereich der Blechumformung.

VERFAHRENSVORTEILE UND EMPFEHLUNGEN FÜR DIE PRAXIS

Durch die berührungslose Kraftaufbringung können auch empfindliche, strukturierte oder beschichtete Oberflächen verarbeitet werden, wenn die Beschichtung die erforderlichen Dehnungen toleriert. Mechanischer Werkzeugverschleiß aufgrund von Tribologie tritt nicht auf und auch der Einsatz von Schmiermitteln ist nicht erforderlich. Der Prozess ist umweltfreundlich, der Reinigungsaufwand während der Produktion wird deutlich reduziert.

Unter den verfahrensspezifischen Umformbedingungen, wie hohen Dehnraten und Geschwindigkeiten, lassen sich für zahlreiche Werkstoffe im Vergleich zu konventionellen Prozessen deutlich höhere Umformgrade erzielen, bevor es zu Werkstoffversagen in Form von Einschnürungen oder Rissbildung kommt. Auch Rückfederungseffekte werden signifikant verringert.

Für die Druckaufbringung ist kein Wirkmedium erforderlich, sodass auch Werkstücke ohne geschlossene Oberfläche, wie zum Beispiel Lochbleche, elektromagnetisch umgeformt werden können. Voraussetzung ist, dass die Wirbelströme einen geschlossenen Strompfad bilden können. Dazu muss das Werkstück bei der elektromagnetischen Kompression und Expansion einen geschlossenen Querschnitt aufweisen.

Der Prozess kann auch unter besonderen Bedingungen, zum Beispiel im Vakuum, unter Reinraumbedingungen oder in radioaktiver Umgebung durch lokale Trennung von Bedienpult und Wirkungsbereich betrieben werden.

Für Werkstoffe mit hoher elektrischer Leitfähigkeit, wie Kupfer- oder Aluminiumlegierungen, lassen sich hohe Wirkungsgrade erreichen. Bei günstiger Abstimmung der Maschinen-, Werkzeug- und Prozessparameter kann das Verhältnis von Umformarbeit zu Kondensatorladeenergie Werte von ca. 25

Prozent erreichen. Bei der Umformung von Werkstoffen mit geringer elektrischer Leitfähigkeit ist der Einsatz eines sogenannten Treibers – einer zusätzlichen Komponente mit hoher elektrischer Leitfähigkeit – möglich, um den Wirkungsgrad zu erhöhen oder den Prozess grundsätzlich zu realisieren.

Um einen hohen Wirkungsgrad zu erreichen, muss der Induktor im Ausgangszustand möglichst nah am Werkstück positioniert sein. Günstig sind Abstände bis zu einem Millimeter. Entfernungen von drei Millimetern sollten keinesfalls überschritten werden.

Der Prozess kann für Blechstärken bzw. Wanddicken von einigen Zehntelmillimetern bis hin zu einigen Millimetern eingesetzt werden. Bei hohen Steifigkeiten und hohen Festigkeiten steigt der Energiebedarf an. Bei sehr geringen Wandstärken ist gegebenenfalls keine effiziente Abschirmung des Magnetfeldes und somit keine Druckaufbringung möglich. Hier kann, genau wie bei geringen Werkstückleitfähigkeiten, der Einsatz eines Treibers notwendig werden. In beiden Fällen ist die Machbarkeit ebenso wie im Fall einer großflächigen elektromagnetischen Umformoperation für die individuelle Anwendung zu prüfen.

- 1 *Durch FEM bestimmte Temperaturverteilung beim induktiven Erwärmen*
- 2 *Durch FEM bestimmte Stromdichteverteilung bei der EMU*
- 3 *Durch EMU getrenntes Aluminiumblech*

Herausgeber

Fraunhofer-Institut für
Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU
Reichenhainer Straße 88
09126 Chemnitz

Telefon +49 371 5397-0
Fax +49 371 5397-1404
info@iwu.fraunhofer.de
www.iwu.fraunhofer.de

**Abteilung Wirkmedienumformung und
Hochgeschwindigkeitstechnologien**

Dr.-Ing. Verena Psyk
Telefon +49 371 5397-1731
Fax +49 371 5397-6-1731
verena.psyk@iwu.fraunhofer.de

© Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen
und Umformtechnik IWU 2021