

Entwicklung einer Anlage zur induktiven Erwärmung von Formplatinen

von **Tobias Vibrans, Roland Malek, Mathias Kotzian, Christian Vogt, Markus Langejürgen**

Zur Beschleunigung der Erwärmung von Platinen für die Herstellung von Warmumformbauteilen wurde in einer Zusammenarbeit zwischen der Volkswagen AG und der SMS Elotherm GmbH eine Anlage zur induktiven Erwärmung von Formplatinen entwickelt und in eine bestehende Versuchsfertigungslinie integriert. Mit Hilfe der entwickelten Anlage werden die Potenziale der induktiven Erwärmungstechnologie für einen Einsatz in der Serienfertigung von Warmumformteilen erprobt.

Development of an induction heating device for press hardening

In order to accelerate the heating of blanks for the production of press hardened parts an induction heating device was developed and integrated in an existing test production line within the framework of a cooperation of Volkswagen AG and SMS Elotherm GmbH. This prototypal device enables the investigation of the characteristics of induction heating in regard of an application in automotive series production.

Für die Herstellung crashtestsrelevanter Karosseriebauteile hat das Fertigungsverfahren der Warmumformung in der Automobilproduktion stark an Bedeutung gewonnen. Mit dem Einsatz des Fertigungsverfahrens ergeben sich große Potenziale in den Bereichen des Fahrzeugleichtbaus und damit in der Reduzierung des Treibstoffverbrauchs und der emittierten Abgase [1]. **Bild 1** zeigt beispielhaft den Einsatz warmumgeformter Bauteile im Fahrzeug Volkswagen Golf VII.

Der Prozess der Warmumformung erfordert eine Austenitisierung der zugeschnittenen Formplatinen. Für diese Wärmebehandlung werden in der automobilen Serienfertigung üblicherweise gasbeheizte Rollenherdöfen eingesetzt, die im Vergleich zu anderen Technologien eine geringe Erwärmungsgeschwindigkeit bedingen [2].

Im Rahmen einer Kooperation der Unternehmen Volkswagen AG und SMS Elotherm GmbH wurde eine Anlage zur induktiven Erwärmung von Formplatinen entwickelt,

angefertigt und in eine bei der Volkswagen AG bestehende Versuchsfertigungslinie integriert. Mit dem Einsatz der

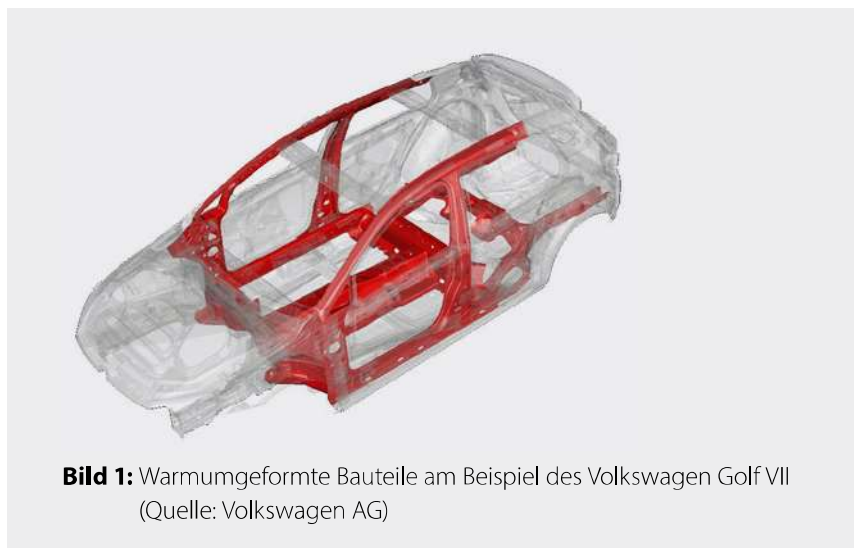


Bild 1: Warmumgeformte Bauteile am Beispiel des Volkswagen Golf VII
(Quelle: Volkswagen AG)

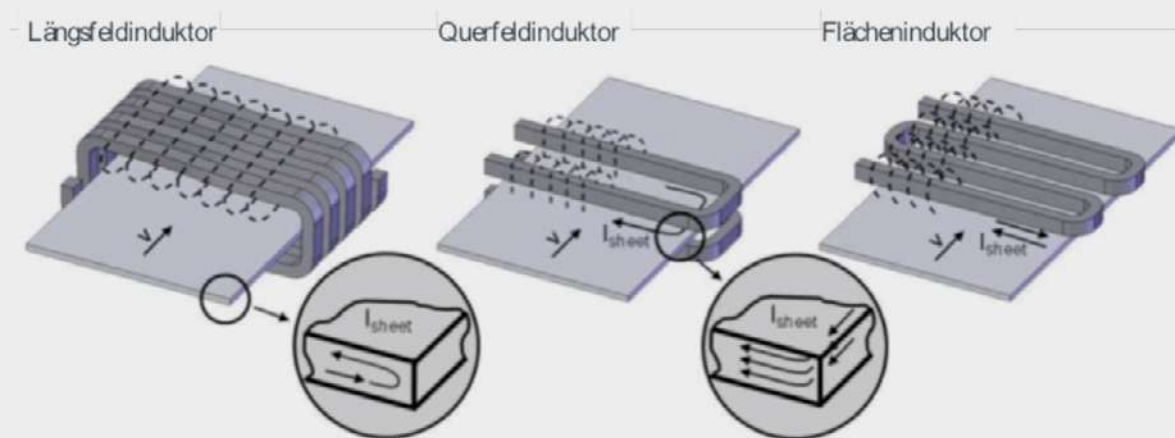


Bild 2: Induktorkonzepte zur Platinerwärmung [2]

induktiven Erwärmungstechnologie bestehen große Potenziale zur Beschleunigung des Erwärmungsvorgangs sowie damit einhergehend Vorteile bezüglich der Ofentaktzeit und dem Platzbedarf der Erwärmungstechnik.

Im vorliegenden Fachbericht werden die entwickelte Erwärmungsanlage sowie die bei der Entwicklung herangezogenen technologischen und fertigungsprozesstechnischen Bedingungen vorgestellt. Zum Abschluss werden erste Erwärmungsergebnisse gezeigt.

STAND DER TECHNIK

Das Fertigungsverfahren der Warmumformung wird zur Herstellung hochfester Karosseriebauteile eingesetzt. Der Warmumformprozess beinhaltet im ersten Schritt eine Austenitisierung der Formplatinen bei Temperaturen oberhalb von 900 °C. Die austenitisierten Platinen werden anschließend automatisiert in ein wassergekühltes Umformwerkzeug eingelegt und in einem Schritt umgeformt sowie abgekühlt. Bedingt durch die hohe Abkühlgeschwindigkeit entsteht ein martensitisches Werkstoffgefüge. Mit dem derzeit üblicherweise in der Warmumformung eingesetzten Werkstoff 22MnB5 werden Zugfestigkeiten von über 1.500 MPa erreicht. Die beschriebene Prozessführung wird auch als direkte Warmumformung bezeichnet [1].

Die für die Warmumformung notwendige Austenitisierung erfolgt in der automobilen Serienfertigung mittels erdgasbeheizten Rollenherdöfen bei Temperaturen von 930-950 °C. Die Vorteile der Rollenherdöfen liegen in einer prozessstabilen Erwärmung unabhängig von der Platinengeometrie. Technologisch und konstruktiv sind Nachteile wie eine geringe Erwärmungsgeschwindigkeit, der hohe Platzbedarf, hohe Ausschussverluste im Falle von Prozessstörungen sowie hohe Anschaffungs- und

Instandhaltungskosten anzuführen [3]. Eine Möglichkeit zur Reduzierung der Ofentaktzeit und des Platzbedarfs der Erwärmungstechnik besteht in der Beschleunigung des Erwärmungsvorgangs. Im Rahmen von Entwicklungsprojekten wurden diesbezüglich Technologien wie induktive [4-6] und konduktive Erwärmung [7], Kontaktplattenerwärmung [8] sowie Wirbelbetterwärmung [3] untersucht.

Die in diesem Bericht im Fokus stehende Technologie ist die induktive Erwärmung. Hierbei erzeugt eine von einem Wechselstrom durchflossene Spule (Induktor) ein elektromagnetisches Wechselfeld. Wenn sich in diesem Feld ein elektrisch leitfähiges Werkstück, z. B. eine Blechplatte, befindet, werden Wirbelströme im Werkstück induziert und das Werkstück infolge Joule'scher Verluste erwärmt [9]. Hinzu kommt im Falle ferromagnetischer Werkstoffe eine Erwärmung infolge von Ummagnetisierungsverlusten [10].

Bild 2 stellt verschiedene Induktorkonzepte zur Erwärmung von Blechen vor. Bei Längsfeldinduktoren verlaufen die Feldlinien des magnetischen Wechselfelds in der Blechebene. Bei Blechdicken von 1-2 mm wird mit Längsfeldinduktoren im Mittelfrequenzbereich infolge der Eindringtiefe der induzierten Ströme eine maximale Temperatur in Höhe der Curie-Temperatur erreicht. Diese liegt für den Werkstoff 22MnB5 bei etwa 740 °C. Der Vorteil der Längsfelderwärmung liegt in einer hohen Erwärmungshomogenität. Bei Querfeld- und Flächeninduktoren verlaufen die Feldlinien des magnetischen Wechselfelds senkrecht zur Platinenoberfläche. Temperaturen bis über die Schmelztemperatur des Werkstoffs können erreicht werden. Nachteile dieser Induktorbauformen sind eine verringerte Erwärmungshomogenität, insbesondere an Platinenkanten sowie Geometrieunstetigkeiten, bzw. geringere Energieeffizienzen [2].

KONSTRUKTIVE RAHMENBEDINGUNGEN

Die Entwicklung der in diesem Bericht vorgestellten induktiven Erwärmungsanlage hat den Anspruch, die Rahmenbedingungen einer Serienproduktionsanlage zu erfüllen. Dazu gehören verschiedene prozess- und technologiespezifische Anforderungen.

In der derzeitigen Serienfertigung warmumgeformter Bauteile werden Taktzeiten von 24 s erreicht, die sich aus etwa 4 s für die Transportdauern der heißen Platine bzw. des umgeformten Bauteils und aus ca. 20 s für die Umform- und Abkühldauer zusammensetzen [4]. Mit Weiterentwicklungen in der Werkzeugkühltechnologie ist mit reduzierten Taktzeiten zu rechnen [11]. Eine induktive Erwärmungsanlage muss die minimal erreichbare Pressentaktzeit ermöglichen.

Bedingt durch die hohe Anzahl verschiedener Warmumformbauteile besteht eine hohe Vielfalt an Platinengrößen und -geometrien (siehe Bild 1). Die Analyse des derzeitigen Portfolios warmumgeformter Bauteile im PKW-Bereich resultiert in dem Anspruch, Platinen einer Breite bis zu 1.500 mm, einer Blechdicke bis zu 2 mm und komplexen geometrischen Konturen erwärmen zu können. Ziel ist die geometrieunabhängige homogene Erwärmung auf Temperaturen bis 950 °C.

Zur Absicherung der Erwärmungstechnologie für den Einsatz in der Serienfertigung ist es erforderlich, den Einfluss der induktiven Erwärmung auf die Eigenschaften produzierter Bauteile zu analysieren. Daraus ergibt sich die Anforderung, die entwickelte Induktionserwärmungsanlage in eine bereits bestehende Versuchsfertigungslinie, bestehend aus Rollenherdofen und Umformpresse, zu integrieren.

ENTWICKLUNG DER ERWÄRMUNGSANLAGE

Induktive Erwärmungsanlagen bestehen aus den Kernkomponenten Umrichter, Kondensatorbatterie und Induktor sowie einer Einheit zur Prozesssteuerung und einer Rückkühlanlage zur Abführung von Verlustenergie. **Bild 3** zeigt die räumliche Anordnung der Anlagenbestandteile sowie die schematische Verschaltung der elektrischen Kernkomponenten der entwickelten induktiven Erwärmungsanlage. Nicht in der Abbildung enthalten sind die Rückkühlanlage, der Netztransformator sowie Komponenten zur Steuerung des Systems. Für die zur Erwärmung von Formplatinen konzipierte Anlage werden zwei Induktoren (4,5) mit einem Transformator (3) und den Kondensatoren (2) zu einem gemeinsamen Schwingkreis zusammengefasst. Der verwendete Umrichter „Elomat EM 22PI“ verfügt über eine Leistung von 800 kW bei Frequenzen bis 10 kHz. Zur Anpassung der Schwingkreisfrequenz können unterschiedliche Kondensatoren pneumatisch zugeschaltet werden. Die Leistungsabgabe des Umrichters wird über eine Sollspannungsvorgabe im Bereich von 300-1.000 V angepasst.

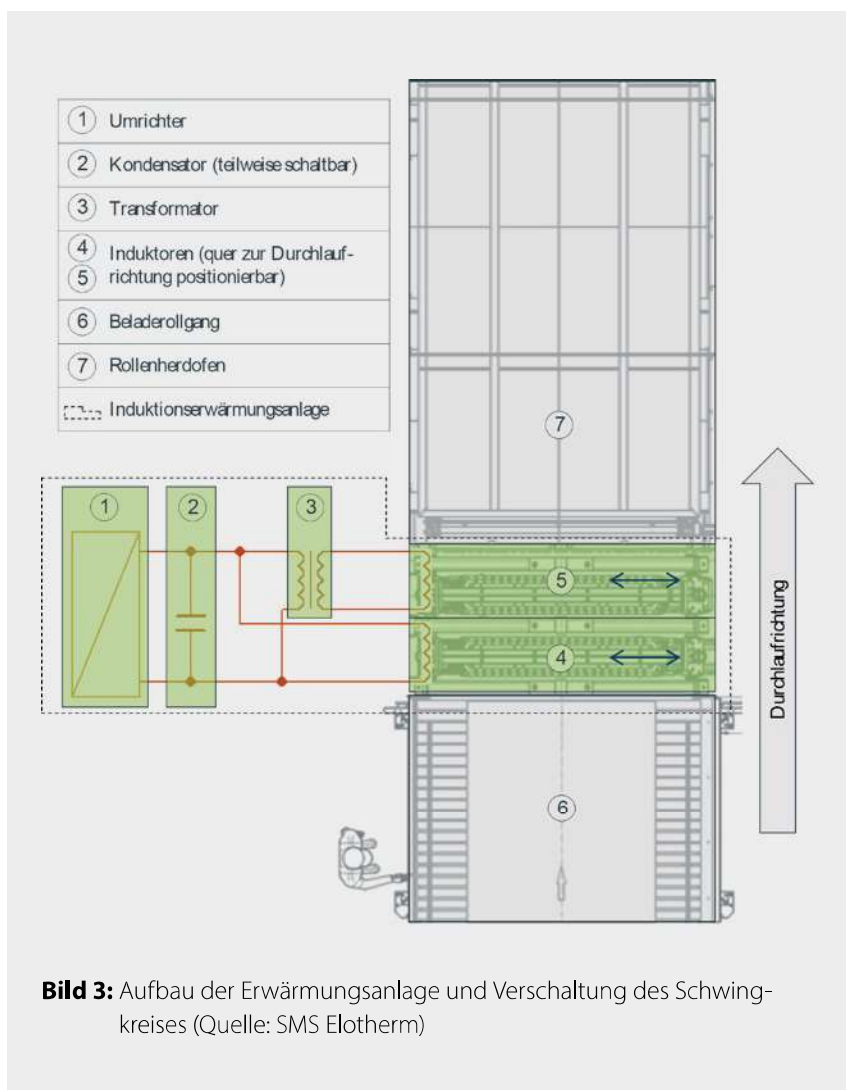


Bild 3: Aufbau der Erwärmungsanlage und Verschaltung des Schwingkreises (Quelle: SMS Elotherm)

Über den Beladerollgang (6) werden die Formplatinen der Erwärmungsanlage zugeführt. Die Platine wird für den Durchtransport beidseitig durch pneumatisch anstellbare Scheibenrollen geklemmt und zwangsgeführt. Diese Konstruktion verhindert eine Kollision von Induktor und Platine infolge thermischen Verzugs oder elektromagnetischer Kräfte.

Die induktive Erwärmung erfolgt mittels der beiden Induktoren, die quer zur Durchlaufrichtung dynamisch positionierbar sind. Mithilfe des Transformators (3) kann die Erwärmungsleistung des zweiten Induktors (5) bei Bedarf angepasst werden. Um einen hohen Wirkungsgrad sicherzustellen sowie Streufelder zu reduzieren, sind die Induktoren mit Transformatorblechen versehen. Eine weitere Steigerung des Wirkungsgrades erfolgt durch eine enge Kopplung zwischen Induktor und Platine. Die Länge der induktiven Erwärmungsstrecke beträgt 1.200 mm.

Durch den direkten Übergang von der Induktionserwärmungsanlage zum Rollenherdofen (6) werden die induktiv erwärmten Platinen unter minimalen Temperaturverlusten

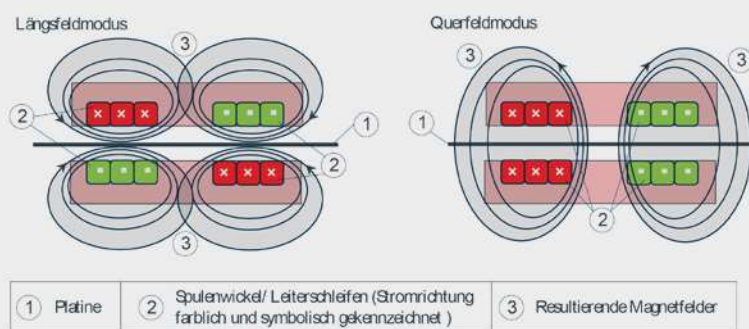


Bild 4: Verschaltung eines Induktors im Quer- bzw. Längsfeld
(Quelle: SMS Elotherm)

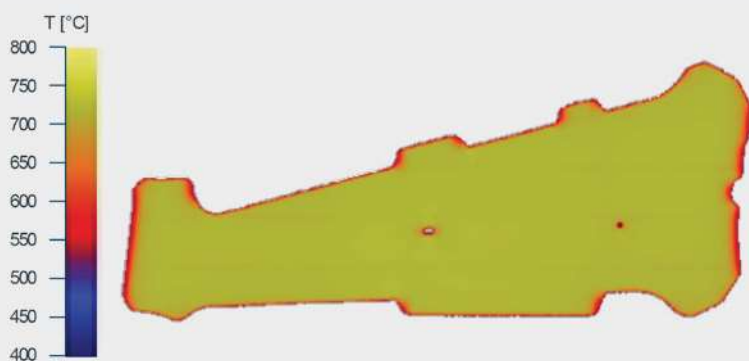


Bild 5: Temperaturverteilung an einer Formplatte (B-Säule) nach induktiver Längsfelderwärmung (Quelle: Volkswagen)

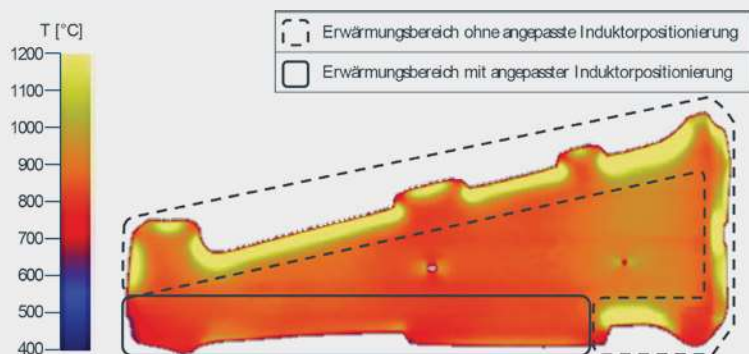


Bild 6: Temperaturverteilung an einer Formplatte (B-Säule) nach Querfelderwärmung (Quelle: Volkswagen)

an die bestehende Versuchsfertigungslinie übergeben. An diesem Übergang wird die Temperatur der Platine mittels eines pyrometrischen Linienscanners des Typs „Landscan LSP-HD 22“ erfasst. Während die Platine den Messbereich durchfährt, werden Messpunkte auf der gesamten Platinenoberfläche erfasst. Die Temperaturmessung erlaubt sowohl eine Kontrolle des induktiven Erwärmungsvorgangs als auch weiterführende, computergestützte Auswertungen. Der

installierte Linienscanner hat einen Messbereich von 400-1.200 °C.

Eine speziell angepasste Induktorkonstruktion, die eine wahlweise Verschaltung der Induktoren im Längs- bzw. Querfeld ermöglicht, erlaubt die Implementierung verschiedener Erwärmungsmodi ohne Induktorwechsel. Die Induktoren bestehen aus flachen Spulenwickeln oberhalb wie auch unterhalb der Werkstückebene, die über eine entsprechende anschlussseitige Verschaltung als Querfeld- oder als geteilter Längsfeldinduktor eingesetzt werden können. **Bild 4** verdeutlicht die beschriebenen Verschaltungsmodi anhand der schematischen Darstellung eines Induktors und zeigt den Verlauf der Feldlinien im Quer- bzw. Längsfeldmodus.

Um das Potenzial der induktiven Technologie zur Erwärmung von Formplatinen umfassend zu untersuchen, wurden drei verschiedene Betriebsmodi entwickelt und in die errichtete Anlage implementiert. Der Betriebsmodus „Längsfelderwärmung“ ist zur Erwärmung von Formplatinen beliebiger Geometrie von Raumtemperatur auf Temperaturen nahe der Curie-Temperatur und damit als Booster für den nachgeschalteten konventionellen Ofen ausgelegt. In diesem Betriebsmodus sind beide Induktoren im Längsfeld verschaltet. Die Frequenz wird durch die schaltbaren Kondensatoren auf einen Bereich von 7-9 kHz eingestellt. Unabhängig von der Platinengeometrie wird eine homogene Temperaturverteilung erreicht (**Bild 5**). Lediglich in den Kantenbereichen wird durch elektromagnetische Anfangs- und End- bzw. Kanteneffekte eine etwas geringere Temperatur erreicht.

Der zweite Betriebsmodus „Kompletterwärmung“ zielt mittels einer Kombination aus Längs- und Querfeld auf die Erwärmung von Formplatinen von Raumtemperatur auf Temperaturen von etwa 950 °C ab. Unter dem ersten, im Längsfeld verschalteten Induktor wird die Platine bis auf Temperaturen nahe der Curie-Temperatur erwärmt. Der zweite Induktor ist im Querfeld verschaltet und übernimmt die Erwärmung der Platine auf die Zieltemperatur von etwa 950 °C. In diesem Modus treten im Zusammenhang mit der Querfelderwärmung starke Kantenüberhitzungen (hohe Temperaturdifferenzen zwischen Bereichen an der Werkstückkante und platinenmittigen Bereichen) auf.

Der dritte Betriebsmodus „Querfelderwärmung“ dient der Erprobung des Potenzials der Querfelderwärmung. In diesem Betriebsmodus sind beide Induktoren im Querfeld verschaltet und können quer zur Durchlaufrichtung dynamisch positioniert werden. Dies ermöglicht das Abfahren der Außenkontur der Platine mit den „Kopfen“ der Induktoren und damit eine Verminderung der Kantenüberhitzung. **Bild 6** zeigt den Einfluss dieser Positionierung auf die Kantenüberhitzung einer erwärmten Formplatte. Im Betriebsmodus „Querfelderwärmung“ wird mit Hilfe der schaltbaren Kondensatoren ein Frequenzbereich von 4-6 kHz eingesteuert. Außerdem

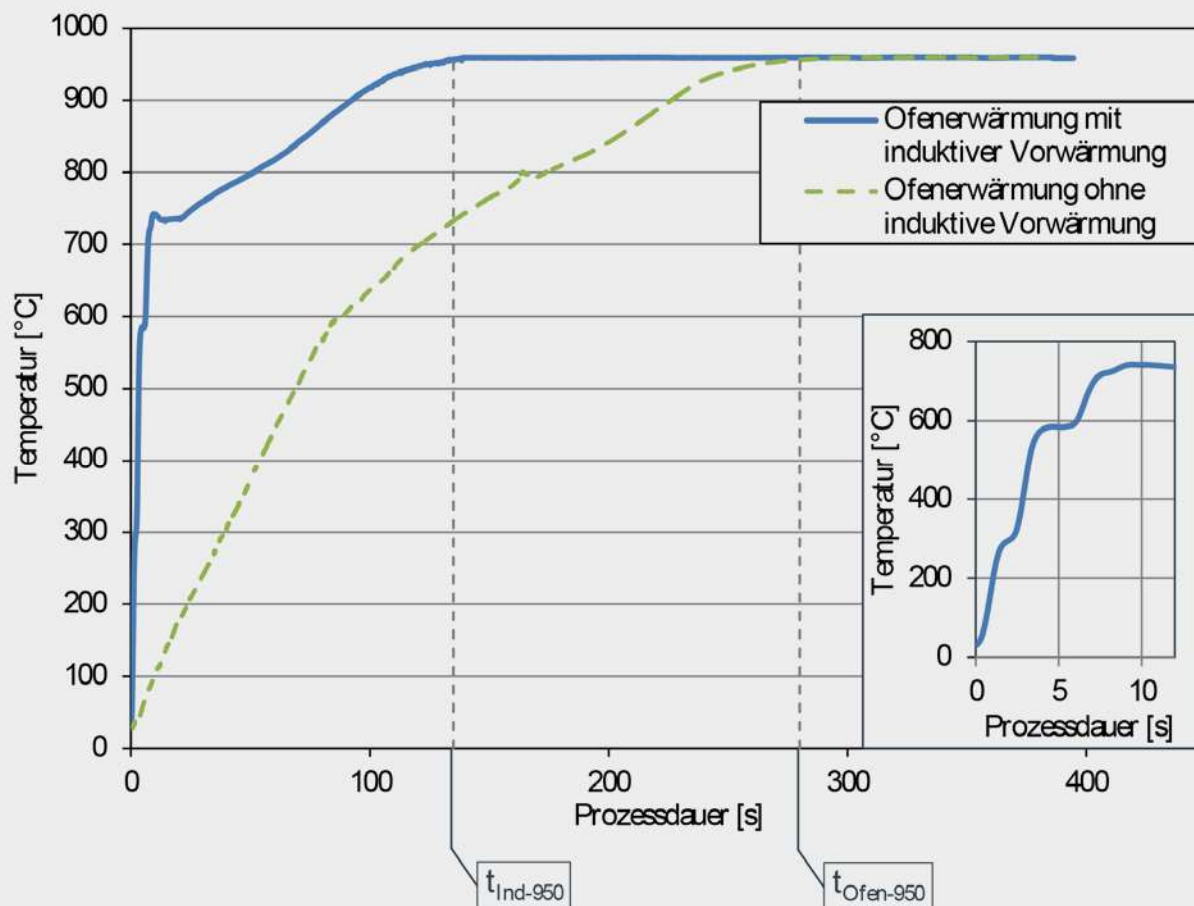


Bild 7: Vergleich der Erwärmungskurven bei Ofenerwärmung bzw. Längsfelderwärmung (Quelle: Volkswagen)

kann die Durchlaufrichtung umgekehrt werden, sodass im Rollenherdofen vorgewärmte Platinen induktiv erwärmt werden. Damit lässt sich eine vor die Quersfelderwärmung vorgeschaltete Längsfelderwärmung simulieren.

Bild 7 zeigt anhand von mittels Thermoelementen aufgenommenen Temperaturverlaufsmessungen das Potenzial der induktiven Erwärmungstechnologie auf. Der Erwärmungsverlauf einer konventionellen Ofenerwärmung und einer induktiven Längsfelderwärmung mit angeschlossener Ofenerwärmung wird gegenübergestellt. Für beide Messungen wurden Platinen des Werkstoffs 22MnB5 mit einer Blechdicke von 2 mm sowie einer – in der direkten Warmumformung üblicherweise aufgebracht – Aluminium-Silizium-Beschichtung eingesetzt. Die Zeitdauer zur Erwärmung der Platine auf die Zieltemperatur von 950 °C beträgt bei Ofenerwärmung mit induktiver Vorwärmung $t_{\text{Ind-950}} \approx 140$ s, bei Ofenerwärmung ohne induktiver Vorwärmung $t_{\text{Ind-950}} \approx 285$ s. Diese Differenz entspricht einer Zeiteinsparung von etwa 50 %. Das Diagramm im unteren rechten Teil der

Abbildung zeigt den Verlauf der induktiven Erwärmung detaillierter auf.

FAZIT

Mit dem Ziel der Beschleunigung des Erwärmungsvorgangs in der Warmumformung wurde in einer Kooperation der Unternehmen Volkswagen AG und SMS Elotherm GmbH eine Anlage zur induktiven Erwärmung von Formplatinen entwickelt, aufgebaut und in eine Versuchsfertigungslinie integriert. Bei der Anlagenauslegung wurden Anforderungen einer Serienproduktion wie Massendurchsatz und Platinengeometrievielfalt berücksichtigt. Eine spezielle Induktorkonstruktion erlaubt verschiedene Betriebsmodi mit Längs- und/oder Quersfelderwärmung. Zur Minimierung der Kantenüberhitzung bei einer Quersfelderwärmung können die Induktoren dynamisch in Abhängigkeit der Platinengeometrie positioniert werden. Die bisher erprobte Längsfelderwärmung zeigt, dass bei der Erwärmung einer 2 mm dicken Platine auf 950 °C eine Einsparung von etwa 50 % im Vergleich zu konventionellen Rollenherdöfen ermöglicht wird.

Die entwickelte Versuchsanlage zur induktiven Erwärmung von Formplatinen eröffnet ein großes Feld an Möglichkeiten zur Erprobung der Technologie. In zukünftigen Versuchen wird sowohl die Längsfeld- als auch die Quersfelderwärmung von Platinen verschiedener Dicken und Geometrien analysiert. Dabei werden auch die erzielten Wirkungsgrade der Erwärmung untersucht. Parallel zur experimentellen Untersuchung wird ein Modell zur simulativen Abbildung des Prozesses erarbeitet. Um den Einsatz der Erwärmungstechnologie in der Serienproduktion von Warmumformbauteilen zu ermöglichen, wird der Einfluss der induktiven Erwärmung auf eingesetzte Zunderschutzbeschichtungen sowie die Weiterverarbeitungseigenschaften gefertigter Bauteile charakterisiert.

LITERATUR

- [1] Neugebauer, R.; Altan T.; Geiger M.; Kleiner M.; Sterzing A.: Sheet metal forming at elevated temperatures. Annals of the CIRP. 2006/55: S. 793-816
- [2] Kolleck, R.; Veit, R.: Inductive heating of Al/Si-coated boron alloyed steels. IDDRG, 2010, S. 151-56
- [3] Tröster, T.; Marten, T.; Adelbert, S.; Kadim, A.: Wirbelbettermwärmung von Platinen für das Presshärten: FOSTA Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V, 2012
- [4] Tröster, T.; Niewel, J.: Einsatz des induktiven Erwärmens von Platinen und Ermittlung der entsprechenden Prozessfenster für das Presshärten. Forschung für die Praxis / Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. im Stahl-Zentrum, Vol 805. Düsseldorf, Verl. und Vertriebsges. mbH, 2014
- [5] Schülbe, H.; Jestremski, M.; Nacke, B.: Numerische Untersuchung induktiver Erwärmungsprozesse für das Presshärten. elektrowärme international. 2011/3, S. 283-88
- [6] Veit, R.; Kolleck, R.; Gasser, C.; Wilfinger, G., (Hrsg.): Development of a close-to-production prototype of an induction heating device for hot stamping of boron alloyed steels, 2011.
- [7] Behrens, B.-A.; Hübner, S.: Konduktive Erwärmung von Formplatinen für das Presshärten. 1. Aufl. EFB-Forschungsbericht, Vol. 400. Hannover: Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V. (EFB), 2014
- [8] Ploshikhin, V.; Prihodovsky, A.; Kaiser, J.; Skutella, L.; Benedickt, C.; Freudenberg, P. et al.: Flexible Wärmebehandlung zur

gezielten Gestaltung von Bauteileigenschaften und zur Erhöhung der Energieeffizienz der Prozesskette Warmumformen (FlexWB), 2012

- [9] Baake, E.; Nacke, B., (Hrsg.): Induktives Erwärmen: Wärmen, Härten, Glühen, Löten, Schweißen. Essen, [München]: Vulkan Verlag GmbH, 2014
- [10] Benkowsky, G.: Induktionserwärmung: Härten, Glühen, Schmelzen, Löten, Schweißen: Grundlagen und praktische Anleitungen für Induktionserwärmungsverfahren, insbesondere auf dem Gebiet der Hochfrequenz: Verlag Technik GmbH Berlin, 1990
- [11] Innovationsallianz "Green Carbody Technologies" – InnoCaT: Forschung für die Energie- und Ressourceneffizienz im Automobilbau. Stuttgart, Fraunhofer Verlag, 2014

AUTOREN



Dipl.-Ing. **Tobias Vibrans**
Volkswagen AG
Wolfsburg
Tel.: 05361 / 9120269
tobias.vibrans1@volkswagen.de



Dr.-Ing. **Roland Malek**
Volkswagen AG
Wolfsburg
Tel.: 05361 / 9122504
roland.malek@volkswagen.de



Dipl.-Ing. **Mathias Kotzian**
Volkswagen AG
Wolfsburg
Tel.: 05361 / 9196088
mathias.kotzian@volkswagen.de



Dipl.-Ing. **Christian Vogt**
SMS Elotherm GmbH
Remscheid
Tel.: 02191 / 891219
c.vogt@sms-elotherm.com



Dr.- Ing. **Markus Langejürgen**
SMS Elotherm GmbH
Remscheid
Tel.: 02191 / 891218
m.langejuergen@sms-elotherm.com