

# NEUE ENERGIEN 2020

## Publizierbarer Endbericht

### Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

### Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

## 1 Einleitung

### 1.1 Ausgangssituation/Motivation des Projektes

Steigende Anforderungen hinsichtlich der Insassensicherheit haben in den letzten Jahren zu einem hohen Entwicklungsdruck im Bereich der Fahrzeugkarosserie geführt. Der Anteil höchstfester Bauteile in der Karosserie nimmt weiterhin zu. Die Warmumformung borlegierter Stähle, das so genannte Presshärten, ist derzeit das bewährte Verfahren zur Herstellung höchstfester Komponenten. Dabei wird die Formplatte auf ca. 950 °C erwärmt, im Anschluss umgeformt und im geschlossenen Umformwerkzeug mit einer Mindestabkühlrate von 27 K/s gehärtet. Die Erwärmung der Platten erfolgt üblicherweise in Rollenherd- oder Hubbalkenöfen. Neben den hohen Investitionskosten und einem großen Platzbedarf zeichnen sich diese Öfen vor allem durch einen geringen energetischen Wirkungsgrad aus. Die Anzahl pressgehärteter Bauteile im Bereich der Fahrzeugkarosserie wird in den nächsten Jahren weiter zunehmen. Am Beispiel des Volkswagen-Konzerns kann das Potenzial aufgezeigt werden. Während in den vergangenen Jahren pressgehärtete Bauteile auf die Ober- und Mittelklasse beschränkt waren, wird diese Technologie in allen Modellen aller Marken Einzug halten [1]. Ein Ausbau der Fertigungskapazitäten ist daher unausweichlich.

### 1.2 Zielsetzungen des Projektes

Mit diesem Projekt sollen die Grundlagen zur Entwicklung einer Serienanlage zur vorrangig induktiven Erwärmung von Al/Si-beschichteten Blechen erarbeitet werden. Dies soll langfristig zu einer Substitution konventioneller Ofentechnologie im Bereich des Presshärtens führen. Hierdurch kann eine deutliche Reduktion des Energiebedarfs je gefertigtem Bauteil erreicht werden. Weiterhin wird der Technologiewechsel zu einer Senkung der Investitionskosten, zu einer Verringerung des Wartungsaufwandes und zu einer Reduktion des Platzbedarfes führen. Wertschöpfungspotenziale ergeben sich sowohl auf Seiten der Anwender, als auch auf Seiten der Anbieter der neuen Erwärmungstechnologie.

### 1.3 Aufbau und Methodik des Projektes

Die Grundlage zur Entwicklung einer alternativen Erwärmungsanlage auf Basis der Induktion stellt die Ermittlung der „wahren“ Erwärmungskurve für Al/Si beschichtete Bleche dar. Mit Kenntnis dieser Temperaturkurve wird das Anlagenkonzept definiert. Geeignete Module zur Ergänzung einer bestehenden Induktionsanlage werden dimensioniert und entwickelt. Basierend auf den

geometrischen Eckdaten der Anlage werden verschiedene Varianten zur Realisierung des Materialtransports in einer Kosten/Nutzenanalyse einander gegenübergestellt. Eine Relativbewegung zwischen Fördersystem und Halbzeug muss dabei ausgeschlossen werden. Geeignete Materialien für das Fördersystem werden mit Hilfe eines Kriterienkatalogs ausgewählt und hinsichtlich Temperaturwechselfestigkeit und ihrer Wechselwirkung mit dem Beschichtungswerkstoff untersucht werden. Nach Aufbau der modifizierten Versuchsanlage erfolgt eine umfangreiche Parameterstudie zur Validierung der ermittelten Temperaturkurve. Nach Ermittlung des optimalen Prozessfensters für die Halbzeugerwärmung werden Umformversuche mit einem bestehenden Werkzeug durchgeführt. Die gefertigten Bauteile werden unter Beachtung der in der Automobilindustrie geltenden Vorgaben hinsichtlich Schweißbarkeit und Lackierbarkeit bewertet. Die Interpretation aller ermittelten Daten liefert im Anschluss die Grundlage für die Entwicklung einer industrietauglichen Erwärmungsanlage.

## 2 Inhaltliche Darstellung

**Tabelle 1:** Übersicht Arbeitspakete

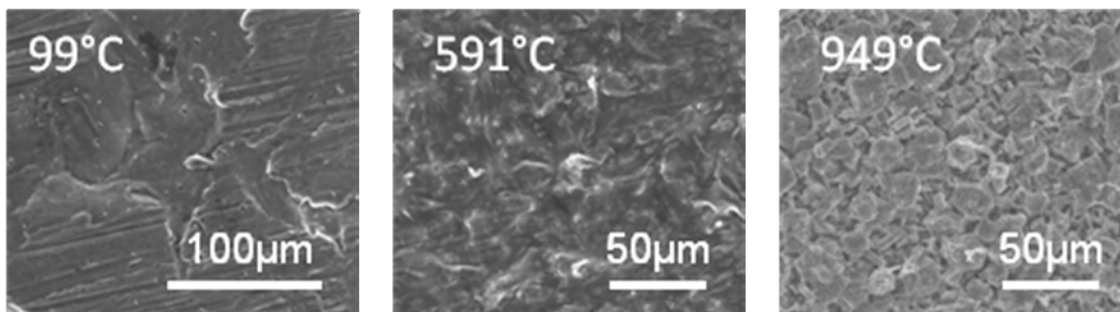
AP Nr.	AP Titel
1	Ermittlung Aufheizkurve
2	Entwicklung Anlagenkonzept
3	Entwicklung Fördersystem
4	Prozessfenster
5	Qualitätssicherung

Das Projekt gliedert sich in fünf Arbeitspakete, die in Tabelle 1 dargestellt sind. Die Grundlage zur Entwicklung einer alternativen Erwärmungsanlage auf Basis der Induktion stellt die Ermittlung der „wahren“ Erwärmungskurve für Al/Si beschichtete Bleche in Arbeitspaket 1 dar. Mit Kenntnis dieser Temperaturkurve wird in Arbeitspaket 2 das Anlagenkonzept definiert. Geeignete Module zur Ergänzung der bestehenden Induktionsanlage werden dimensioniert und entwickelt. Basierend auf den geometrischen Eckdaten der Anlage werden in Arbeitspaket 3 verschiedene Varianten zur Realisierung des Materialtransports in einer Kosten/Nutzenanalyse einander gegenübergestellt. Eine Relativbewegung zwischen Fördersystem und Halbzeug muss dabei ausgeschlossen werden. Geeignete Materialien für das Fördersystem werden mit Hilfe eines Kriterienkatalogs ausgewählt und hinsichtlich Temperaturwechselfestigkeit und ihrer Wechselwirkung mit dem Beschichtungswerkstoff untersucht werden. In Arbeitspaket 4 erfolgen der Aufbau der modifizierten Versuchsanlage und eine umfangreiche Parameterstudie zur Validierung der ermittelten Temperaturkurve. Nach Ermittlung des optimalen Prozessfensters für die Halbzeugerwärmung werden Umformversuche mit einem bestehenden Werkzeug durchgeführt. Die gefertigten Bauteile werden unter Beachtung der in der Automobilindustrie geltenden Vorgaben hinsichtlich Schweißbarkeit und Lackierbarkeit bewertet. Diese vergleichenden Untersuchungen sind in Arbeitspaket 5 zusammengefasst. Die Interpretation aller ermittelten Daten liefert im Anschluss die Grundlage für die Entwicklung einer industrietauglichen Erwärmungsanlage.

### **AP1: Charakterisierung des Erwärmungsverhaltens Al/Si-beschichteter Blechwerkstoffe**

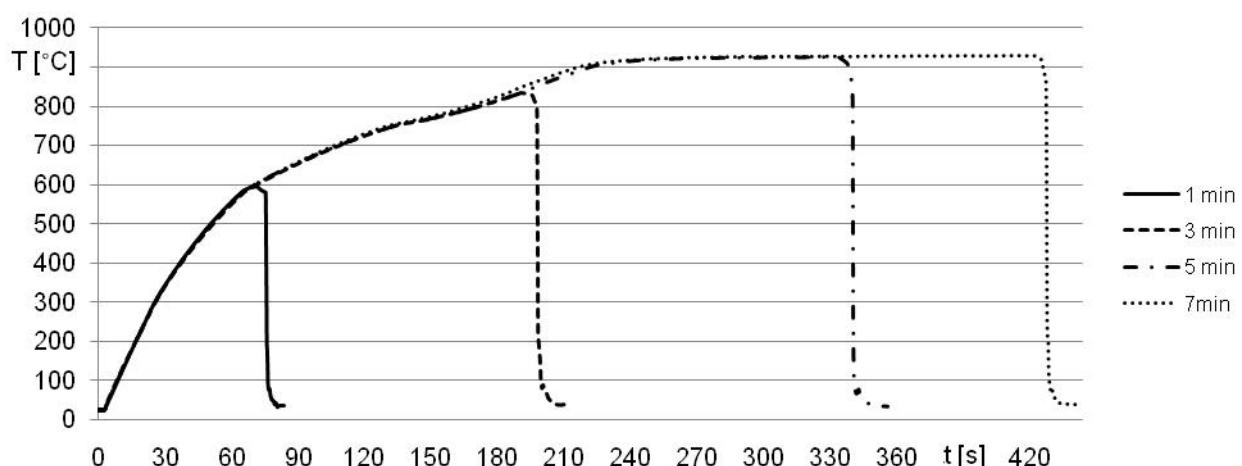
Im ersten Arbeitspaket wurde das Temperaturverhalten der Al/Si-Beschichtung untersucht. Im Mittelpunkt stand dabei die Temperatur/Zeitabhängigkeit des Diffusionsprozesses von Eisen in den Beschichtungswerkstoff und die damit verbundene Erhöhung der Schmelztemperatur der Beschichtung. Es wurde nachgewiesen, dass ein Aufschmelzen der Beschichtung bei der Verwendung

industriell relevanter Heizraten nicht vermieden werden kann. Diese Untersuchungen mit Unterstützung des Österreichischen Zentrums für Elektronenmikroskopie und Nanoanalytik (FELMI-ZFE), Graz durchgeführt. Runde Proben mit einem Durchmesser von 5 mm wurden mit einem Rasterelektronenmikroskop untersucht. Die Proben wurden auf einer Heizbühne montiert und auf 950 °C erhitzt. Die Aufheizgeschwindigkeit war auf 50 K/min begrenzt. Abbildung 1 zeigt die Ergebnisse dieser Untersuchungen. Bei 99 °C entspricht die Oberfläche der Beschichtung noch immer dem Lieferzustand. Das Material zeigt typische Oberflächenstrukturen aus dem Beschichtungsprozess. Bei 591 °C verschwinden diese Strukturen, da die Beschichtung in die flüssige Phase über geht. Bei 949 °C zeigt die Beschichtung eine völlig neue Kornstruktur und ist vollständig wiedererstartet.



**Abbildung 1:** Erwärmung von 22MnB5 mit Al/Si-Beschichtung im Rasterelektronenmikroskop

Zur Untersuchung der Beschichtungszusammensetzung in Abhängigkeit von Erwärmungsdauer und -temperatur wurden Proben von Al/Si-beschichtetem 22MnB5 von ThyssenKrupp Steel Europe (MBW 1500 AS) in einem elektrisch beheizten Kammerofen erwärmt. Die Ofentemperatur wurde auf 920 °C eingestellt, die Temperatur der Platinen wurde mit aufgeschweißten Thermoelementen vom Typ-N gemessen. Die Haltezeit im Ofen wurde zwischen einer und sieben Minuten variiert und die Bleche nach der Entnahme aus dem Ofen in Wasser abgeschreckt (siehe Abbildung 2).



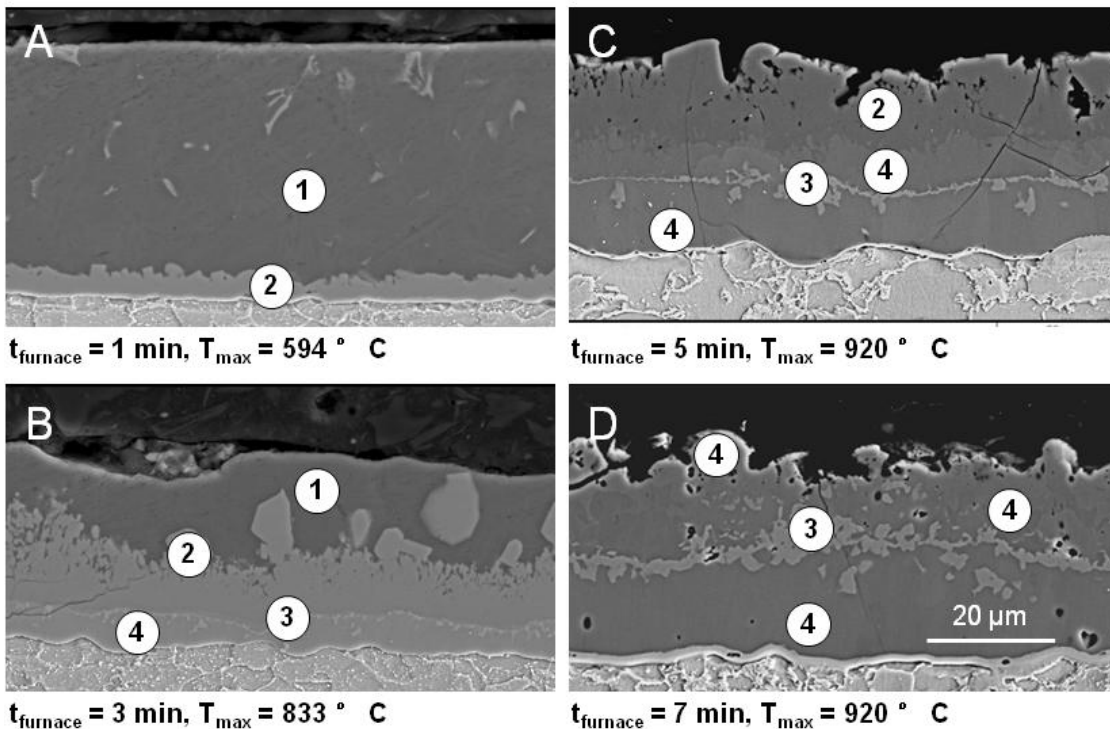
**Abbildung 2:** Bauteiltemperatur in Abhängigkeit der Ofenverweildauer, Ofentemperatur 920 °C

Die Proben wurden röntgenspektroskopisch untersucht. In Tabelle 1 sind alle Phasen zusammengefasst, die bei der Messung nachgewiesen werden konnten. Die Prozentangaben der verschiedenen Metalle sind Durchschnittswerte mehrerer Messungen. Die Schmelztemperaturen werden nach Landolt-Börnstein zitiert [2].

**Tabelle 2:** Zusammenfassung ermittelter Phasen

no.	phase	formula	Al [wt%]	Si [wt%]	Fe [wt%]	$T_{\text{melt}}$ [°C]
1		Al + Si	87	10	3	577
2	$\tau_5$	$\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$	56	9	35	855
3	$\tau_1$	$\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{Si}$	32	13	55	1050
4	$\eta/\zeta$	$\text{Fe}_2\text{Al}_5/\text{FeAl}_2$	49	2	49	1156

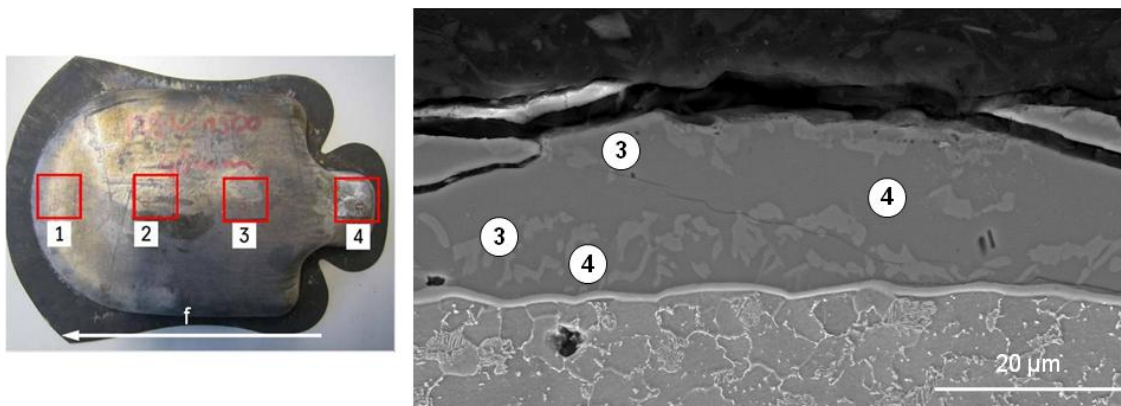
Abbildung 3 zeigt die gebildeten Phasen für jede Ofenverweilzeit bzw Endtemperatur. In Abbildung 3A, nach einer Minute mit einer maximalen Temperatur von 594 °C, ist fast keine Veränderungen im Vergleich zum Anlieferungszustand erkennbar. Dies zeigt, dass die Diffusion unterhalb der Schmelztemperatur der Beschichtung nur sehr langsam voranschreitet. Nach drei Minuten (Abbildung 3B) liegt über dem Grundmaterial eine  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  oder  $\text{FeAl}_2$  Phase ( $\eta$  oder  $\zeta$ ) vor mit einer geringen Löslichkeit für Silizium. Das Silizium wird in die nächste Schicht abgegeben, eine  $\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{Si}$  Phase ( $\tau_1$ ). Darüber befindet sich eine  $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ -Phase ( $\tau_5$ ), die bei der erreichten Temperatur von 833 °C im festen Zustand vorgelegen haben muss. An der Oberfläche befindet sich noch immer ein Anteil aus Aluminium und Silizium. Nach 5 Minuten (Abbildung 3C) hat die  $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ -Phase die Oberfläche erreicht und die  $\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{Si}$ -Phase ist zwischen zwei horizontalen Schichten der Phase  $\text{Fe}_2\text{Al}_5/\text{FeAl}_2$  eingebettet. Nach sieben Minuten (Abbildung 3d) ist die  $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$  Phase völlig verschwunden und nur noch zwei Phasen liegen vor:  $\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{Si}$  zwischen  $\text{Fe}_2\text{Al}_5/\text{FeAl}_2$ .



**Abbildung 3:** Phasenbildung in Abhängigkeit der Verweilzeit im konventionellen Kammerofen

Nach fünf Minuten zeigt sich die typische raue Oberflächenstruktur konventionell erwärmter Al/Si-beschichteter Platinen. Laut Jiang liegen die thermischen Ausdehnungskoeffizienten von intermetallischen Phasen zwischen den Koeffizienten ihrer Bestandteile [3]. Betrachtet man die sehr unterschiedlichen prozentualen Anteile der Elemente in den verschiedenen Phasen, so kann die Entstehung der Hohlräume und Risse unter Umständen auf inhomogene thermische Schrumpfungen in der Beschichtung, auf das Auftreten starker Schubspannungen und auf die Sprödigkeit der intermetallischen Phasen zurückgeführt werden. Außerdem ist in Abbildung 3B ersichtlich, dass die Ausbildung der  $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ -Phase nicht ausschließlich horizontal verläuft. Die relativ niedrige Aufheizgeschwindigkeit könnte zu einer Bevorzugung nicht-horizontaler Diffusionsströme führen, die zu einer ungleichmäßigen Transformation der verbleibenden Al/Si-Schicht führt.

Soll die induktive Erwärmung für den Einsatz bei Al/Si-beschichtetem Material geeignet sein, so müssen sich die gleichen Phasen ausbilden, wie bei der konventionellen Ofenerwärmung. Erste Versuche haben gezeigt, dass die hohe Heizrate zu einem vollständigen Aufschmelzen der Beschichtung führt und durch die Einwirkung des Magnetfeldes ein Teil der Beschichtung am hinteren Ende der Formplatine angehäuft wird oder sogar abtropft. Für die Untersuchung der Phasenbildung wurden Formplatinen auf  $920\text{ }^\circ\text{C}$  erhitzt, anschließend umgeformt und im Formwerkzeug abgeschreckt. Abbildung 4 zeigt ein fertiges Bauteil mit der Angabe zur Vorschubrichtung durch die Erwärmungsanlage und den Bereichen aus denen Schliffproben entnommen wurden.



**Abbildung 4:** Pressgehärtetes Bauteil, induktiv erwärmt und Phasenbildung in Bauteilbereich 2

Im Bereich 4 kann eine Anhäufung von Al/Si beobachtet werden, was auf die Kraftwirkung des Magnetfeldes auf die flüssige Beschichtung zurückgeführt werden kann. Das Verdrängen der Beschichtung kann auch in den anderen Bereichen beobachtet werden, da hier die Höhe der Beschichtung deutlich verringert wurde. Das Schlichtbild in Abbildung 4 ist für diese drei Bereiche repräsentativ, die Phasen sind ebenfalls nach Tabelle 2 nummeriert. Die wichtigste Beobachtung ist zunächst, dass trotz der sehr kurzen Aufheizzeit die gleichen Phasen vorhanden sind wie bei der herkömmlichen Erwärmung nach sieben Minuten:  $\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{Si}$  eingebettet in  $\text{Fe}_2\text{Al}_5/\text{FeAl}_2$ . Es fällt auf, dass die  $\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{Si}$ -Phase nicht horizontal ausgerichtet ist sondern verteilt bis nahe der Oberfläche auftritt. Wenn auch Risse beobachtet werden können, so zeigt die Oberfläche eine deutlich reduzierte Rauheit und weniger Hohlräume als bei konventioneller Erwärmung.

Ein Erklärungsansatz für die Verteilung der  $\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{Si}$  Phase liegt in der hohen Heizrate beim induktiven Erwärmungsprozess. Im Kammerofen wird die Zwischenphase  $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$  im festen Zustand

gebildet und die Anzahl der Kristallisationskeime ist begrenzt. Mit Induktionserwärmung wird die Schmelztemperatur der  $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$  Phase (855 °C) sehr schnell überschritten. Eisen besitzt im Vergleich zu Silizium eine deutlich höhere Diffusionsgeschwindigkeit was zunächst zu einer schnellen Bildung von  $\text{Fe}_2\text{Al}_5/\text{FeAl}_2$  in der Nähe des Substrats führt. Da die  $\text{Fe}_2\text{Al}_5/\text{FeAl}_2$ -Phase eine geringe Löslichkeit für Silizium aufweist, liegt eine hohe Anzahl von Keimen für die Bildung der  $\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{Si}$ -Phase vor. Während der darauf folgenden schnellen Erstarrung der oberflächennahen Region durch die Bildung von  $\text{Fe}_2\text{Al}_5/\text{FeAl}_2$  wird Silizium lokal ausgeschieden und führt zu weiteren, verteilten Inseln von  $\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{Si}$ . Die reduzierte Oberflächenrauigkeit könnte durch das schnelle „Überspringen“ der  $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ -Phase hervorgerufen werden, so dass die Bedeutung nicht-horizontaler Diffusionsströme in den Hintergrund rückt. Außerdem könnte die gestreute Verteilung der  $\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{Si}$ -Phase die Schubspannungen zwischen den vorhandenen Phasen reduzieren, die auf Grund unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten vorliegen.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass mit der schnellen induktiven Erwärmung die gleichen intermetallischen Phasen in der Al/Si-Beschichtung erzeugt werden wie mit der konventionellen Ofenerwärmung. Der Fokus bei der weiteren Ermittlung einer optimalen Erwärmungskurve lag daher auf der Untersuchung des Einflusses des elektrischen Magnetfeldes auf die schmelzflüssige Beschichtung, um durch eine geeignete Wahl der Prozessparameter ein Abtropfen der Beschichtung zu verhindern. Hierzu wurde die bereits bestehende zweistufige induktive Erwärmungsanlage und ein konventioneller Kammerofen genutzt. Es wurde festgestellt, dass zwischen 600 °C und 700 °C keine induktive Erwärmung möglich ist, da hier die Wirkung der Feldkräfte grundsätzlich ein Verschieben der Beschichtung hervorruft.

### **AP2: Entwicklung Anlagenkonzept**

Zur Abbildung der zuvor dargestellten Erwärmungskurve mit einer Versuchsanlage wurde ein vierstufiger Aufbau gewählt:

1. Längsfeldspule zur Erwärmung bis 600 °C
2. Induktiv beheizter Muffelofen
3. Flächenspule
4. Widerstandsbeheizter Temperaturhalteofen

### **AP3: Entwicklung Fördersystem**

Als Grundlage für die Entwicklung eines Fördersystems wurde ein Pflichtenheft erarbeitet. Hieraus ergeben sich folgende Anforderungen:

- Das Magnetfeld der Induktoren darf nur in der Formplatine einkoppeln.
- Die verwendeten Werkstoffe für aktive Bauteile die dem Magnetfeld ausgesetzt sind, dürfen weder magnetisch noch elektrisch leitend sein.
- Alle Bauteile müssen eine Temperaturbeständigkeit bis 1100 °C aufweisen.
- Der Wärmeentzug durch die Handhabungseinrichtung muss so gering wie möglich sein.
- Zwischen der Formplatine und dem Fördersystem darf aufgrund der streckenweise flüssigen Phase der Beschichtung keine Relativbewegung entstehen.
- Transportwege außerhalb der Spulen sollen so kurz wie möglich gehalten werden um Temperaturverluste, diese entsprechen an Luft zwischen 10 und 15 K/s, zu minimieren.
- Die Transportgeschwindigkeit der Platine muss vom Stillstand bis hin zu 100 mm/s stufenlos und reproduzierbar einstellbar sein.
- Die Haupttransportrichtung ist vorwärts, ein Umschalten auf Rückwärtstransport muss jedoch möglich sein.



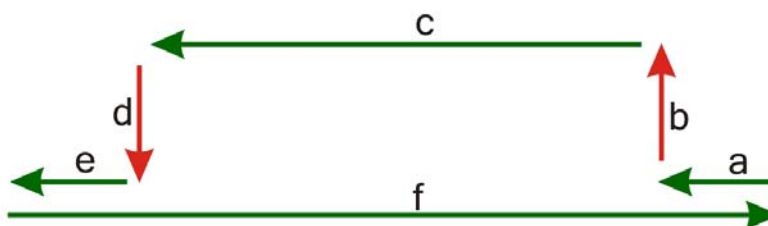
- Die Handhabungseinrichtung muss an verschiedene Geometrien von Formplatinen schnell und unkompliziert anpassbar sein.
- Ein gleichmäßiger Abstand zwischen Flächenspule und Platine ist ausschlaggebend für die gleichmäßige Erwärmung der Platine. Deshalb muss sichergestellt werden, dass die Formplatine vor der Flächenspule eben ist. Dafür ist ggf. eine Richteinheit vorzusehen.

Mit Hilfe eines morphologischen Kastens wurden verschiedene Systeme einander gegenübergestellt (siehe Tabelle 3).

**Tabelle 3:** Konzeptfindung mit Hilfe des morphologischen Kastens

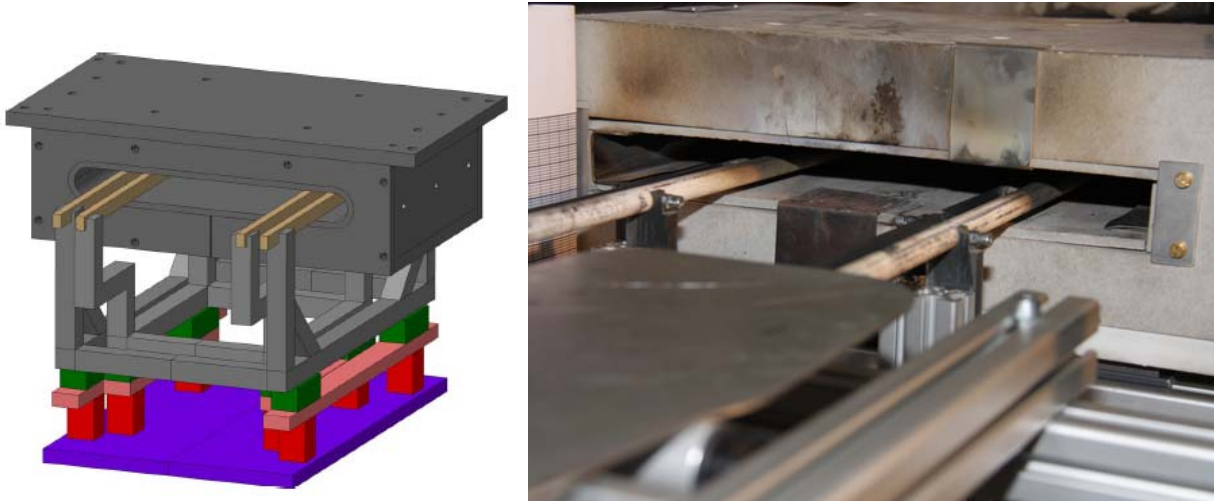
Teilfunktionen	Teillösung 1	Teillösung 2	Teillösung 3	Teillösung 4	Teillösung 5
Formplatine der Erwärmungsanlage zuführen	manuelle Zuführung der Platine	Feedersystem	Robotersystem	mechanische Lösung	hydraulisch oder pneumatisch
Aufnahme / Mitnahme der Platine	Platinenträger	Mitnehmerpacken	Haftreibung	--	--
Transport der Platine	Kettenförderer	Rollenbahn	Transportband	Wagentransport	Hubbalken
Antrieb des Transportsystems	hydraulisch oder pneumatisch	mechanisch / manuell	E-Motor	--	--
Erwärmung	induktiv	--	--	--	--
Anordnung der Erwärmungs-	zufällig	rotatorisch	translatorisch / seriell	translatorisch / parallel	--
Signalverarbeitung	manuell durch Personal	Pneumatische Steuerung	Steuerung durch elektrische IC-Logikbausteine	SPS- Steuerung	Mikroprozessor-Steuerung
Bedienung: Richtung und Geschwindigkeit	mechanisch über Getriebestufen	elektronisch	Volumenstrom eines Fluids	manuell durch Personal	--
Übergabe der Platine	manuelle Zuführung der Platine	Feedersystem	Robotersystem	mechanische Lösung	hydraulisch oder pneumatisch

Als zielführend wurde der Aufbau eines Hubbalkensystems eingestuft. Hubbalkenförderer können für Induktionsöfen üblicherweise nicht eingesetzt werden, da ihre Balken von Exzentern bewegt werden und sie weder eine konstante Fördergeschwindigkeit noch eine konstante Förderhöhe erreichen können. Aus diesem Grund wurde eine modifizierte Kinematik entwickelt. Der Bewegungsablauf ist in Abbildung 5 dargestellt.



**Abbildung 5:** Kinematik des Hubbalkensystems

Die Gesamtbewegung setzt sich aus horizontalen und vertikalen Bewegungen zusammen. Die einzelnen Bewegungsphasen des Hubbalkens sind: a) Beschleunigen, b) Heben, c) Transportieren, d) Senken e) Abbremsen und f) Rücklauf bestehend aus Beschleunigung und Verzögerung. Um eine kontinuierliche Bewegung zu erreichen, werden zwei Hubbalken eingesetzt, die sich im Bewegungsablauf teilweise überlappen.

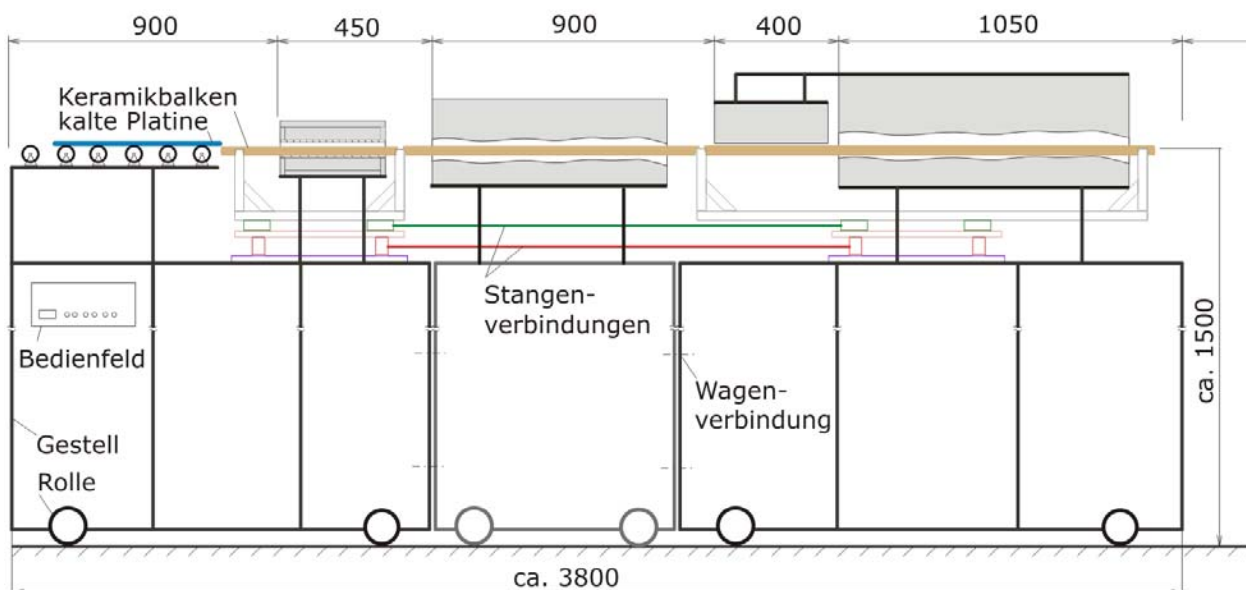


**Abbildung 6:** Längsfeldinduktor mit integriertem Hubbalkenfördersystem (Prinzip und Realbild)

Abbildung 6 zeigt das Prinzip des Fördersystems und die umgesetzte Ausführung. Als Trägerbalken kommen keramische Rohre zum Einsatz, die zum einen die Anforderungen in Bezug auf Temperaturbeständigkeit und geringe Bauhöhe erfüllen und zum anderen als Halbzeuge kostengünstig erhältlich sind.

#### AP4: Bestimmung des Prozessfensters

Im vierten Arbeitspaket wurden alle Erwärmungsmodule sowie das Fördersystem zu einer Gesamtanlage zusammengebaut. Abbildung 7 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Anlage mit einer Gesamtlänge von 3,8 m.



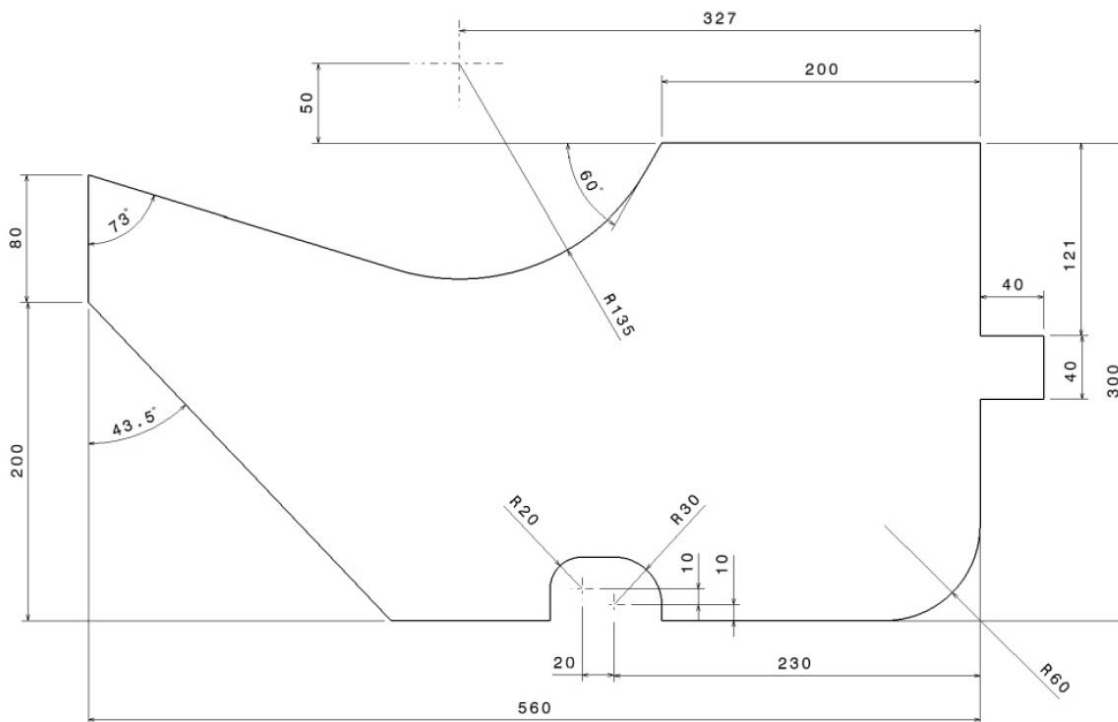
**Abbildung 7:** Prinzipieller Aufbau der Versuchsanlage



Die Messung der Temperatur stellt bei der induktiven Erwärmung eine besondere Herausforderung dar. Grundsätzlich kann die Temperatur der Formplatte taktill oder berührungslos gemessen werden. Für die berührungslose Messung können Strahlungsthermometer, sogenannte Pyrometer, oder Wärmebildkameras eingesetzt werden. Sie bestimmen die Temperatur des Messobjekts über die von ihm abgegebene Wärmestrahlung. Diese ist jedoch abhängig vom Emissionsgrad des Materials, der wiederum abhängig von der Temperatur des Materials ist. Bei der Erwärmung von Al/Si-beschichtetem Material kommt die kontinuierliche Umwandlung der Beschichtung während des Erwärmungsprozesses hinzu, wodurch sich ebenfalls der Emissionsgrad ändert. Die Messung der Wärmestrahlung ist diesem Anwendungsfall daher lediglich zur Bewertung der Temperaturverteilung über die gesamte Oberfläche der Formplatte einsetzbar. Hierzu wurde eine Wärmebildkamera vom Typ VarioCAM der Firma Jenoptik verwendet mit einem Spektralbereich von 7,5 bis 14  $\mu\text{m}$ . Der Temperaturmessbereich reicht von -40 bis 1200  $^{\circ}\text{C}$  mit einer Temperaturauflösung kleiner 0,08 K bei Raumtemperatur.

Zur Bestimmung der exakten Blechtemperatur und zum Abgleich der Messungen mit der Wärmebildkamera wurden Thermoelemente vom Typ N verwendet. Diese wurden aus Einzelelementdrähten und keramischen Isolationsperlen zusammengesetzt. Mit Thermoelementen vom Typ N können Temperaturen bis 1300  $^{\circ}\text{C}$  gemessen werden. Weiterhin sind sie gegen Hochtemperaturkorrosion beständig und ertragen auch schnelle Temperaturwechsel, wie sie z.B. beim Abschrecken der Formplatten in Wasser auftreten. Zur Erreichung eines optimalen Wärmeübergangs zwischen Blech und Thermoelement wurden die Elementdrähte mittels Widerstandsschweißen auf die Formplatten aufgebracht. Die Erfassung der Messwerte erfolgte mit Hilfe des Messmoduls NI9211 sowie der Software Labview der Firma National Instruments.

Um im Versuchsverlauf die Anforderungen der Automobilindustrie mit zu berücksichtigen wurde eine Platinengeometrie entwickelt, die eine möglichst große Anzahl von typischen Merkmalen aktuell verwendeter Formplatten für die Warmumformung in sich vereint. Hierzu wurde das Bauteilespektrum eines Automobilzulieferers herangezogen. Kritische Geometriemerkmale stellen für die induktive Erwärmung Veränderungen der Plattenbreite bezogen auf die Förderrichtung dar sowie 90° Außenkanten, Laschen und unterschiedliche Radien. All diese Merkmale wurden in der Versuchsplatte vereint (Abbildung 8).



**Abbildung 8:** Versuchsplatte mit industrietypischen Geometriemerkmalen

Wie in Arbeitspaket 1 ermittelt kann die beschichtete Formplatte in Modul 1 nur bis zum Schmelzpunkt der Beschichtung erwärmt werden. Hierfür wurde in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit die notwendige Spulenspannung ermittelt und die Temperaturverteilung mit der Wärmebildkamera bewertet.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass das Modul 2 (Muffelofen) nicht nur die Aufgabe hat den Diffusionsprozess während der Flüssigphase der Beschichtung zu gewährleisten, sondern auch für einen Ausgleich der Temperaturunterschiede innerhalb der Platte sorgen muss. Neben der Messung der Temperaturverteilung wurden die erwärmten Platten auch hinsichtlich eines möglichen Aufschmelzens der Beschichtung und der daraus resultierenden Verschiebung derselben visuell bewertet.

### AP5: Qualitätssicherung

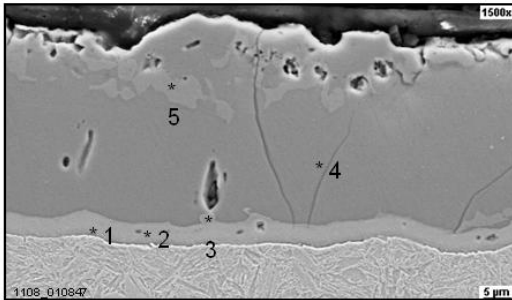
Die grundsätzliche Bewertung der industriellen Einsetzbarkeit des Erwärmungsverfahrens erfolgt anhand der Lackier- bzw. Schweißbeignung der hergestellten Bauteile. Die Diskussion mit Automobilherstellern und Zulieferer ergab, dass sich in Bezug auf die Schweißbarkeit nur dann Probleme ergeben, wenn Al/Si-beschichtetes Material zu lange auf hoher Temperatur gehalten wird (>25 min). Dadurch diffundiert Aluminium in das Grundmaterial, wodurch sich die Dicke der intermetallischen Phase erhöht, was sich wiederum negativ auf die Prozessparameter beim Punktschweißen auswirkt. Da das grundsätzliche Ziel dieses Projektes in einer Verkürzung der Erwärmungszeit im Vergleich zur konventionellen Ofenerwärmung liegt, wurde eine negative Beeinflussung der Schweißbarkeit durch den Erwärmungsprozess ausgeschlossen. Der experimentelle Nachweis wurde daher ausgelassen. Der Fokus der qualitätssichernden Maßnahmen lag in der Folge bei der Untersuchung der Gefügeumwandlung innerhalb der Beschichtung sowie der Bewertung der Lackhaftung im Gitterschnittverfahren.

Für die Gefügeuntersuchungen wurden Proben innerhalb von 100s vierstufig auf 930 ° C erwärmt, 25 s auf Temperatur gehalten und dann in Wasser abgeschreckt. Die Referenzprobe wurde in einem konventionellen Kammerofen ebenfalls auf 930 ° C erhitzt, mit einer Gesamtofenzeit von 360 s. Zum Vergleich der beiden unterschiedlichen Erwärmungstechnologien wurden die Beschichtungen bezüglich ihrer chemischen Zusammensetzung mittels Energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) charakterisiert. Die kristallographischen Orientierungen und Phasen der einzelnen Körner innerhalb der Schicht wurden durch Electron Backscatter Diffraction (EBSD) bestimmt. Für die EDX-Analysen wurden Querschliffe mit 4%er alkoholischer HNO<sub>3</sub>-Lösung geätzt. Für die EBSD-Messungen wurden Querschliffe mit kolloidaler Kieselsäure poliert, um Oberflächenverformungen zu minimieren. Für beide Messungen wurde das Rasterelektronenmikroskop LEO 1530 FE-SEM (Carl Zeiss, Deutschland) ausgestattet mit TSL EBSD-System und EDX-Analyse-System (EDAX Gemini) verwendet.

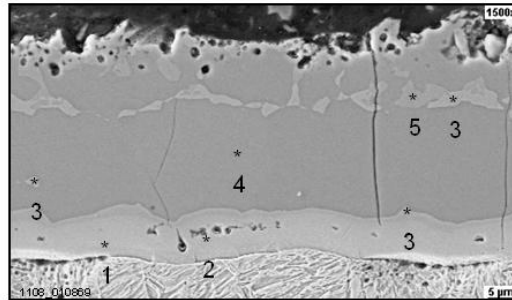
Die Querschliffe beider Proben geben in der EDX-Analyse den Hinweis auf die Existenz von fünf verschiedenen Phasen innerhalb der wärmebehandelten Beschichtung (siehe Abbildung 9). Nach dem ternären Phasendiagramm [4] für Fe, Al und Si befindet sich eine Diffusionsschicht aus den Eisen-reichen Phasen  $\alpha$ -Fe, Fe<sub>3</sub>(Al, Si) und Fe(Al, Si) an der Schnittstelle mit dem Stahlsubstrat. Darüber befindet sich mit Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> die Hauptphase der Beschichtung. Im Falle der induktiven Erwärmung findet sich eine zusätzliche Si reiche Schicht, bestehend aus Fe<sub>3</sub>(Al, Si)<sub>5</sub> ( $\tau_1$  Phase) eingebettet in der Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> Matrix.

Bei der konventionellen Ofenerwärmung besteht die Silizium reiche Schicht aus Fe<sub>3</sub>(Al, Si)<sub>5</sub> und Fe(Al, Si). Es zeigt sich somit ein höherer Fe-Gehalt innerhalb dieser Schicht nahe der Oberfläche. Ein weiterer Unterschied zwischen den beiden Erwärmungstechnologien zeigt sich in der intermetallischen Diffusionsschicht. Sowohl die höhere intermetallische Diffusionsschicht und der höhere Fe-Anteil in der Si-reichen Schicht bei der konventionellen Erwärmung deuten auf einen höheren Durchlegierungsgrad hin als bei der kombinierten induktiven Erwärmung. Während beide Beschichtungen etwa die gleiche Dicke aufweisen führt die konventionelle offensichtlich zu einer höheren Oberflächenrauigkeit.

Combined inductive heating



Reference: conventional heating



Point of analysis	Al At%	Si At%	Fe At%	Phase	Crystal system
1	5,8	2,3	91,9	$\alpha$ -Fe	cubic
2	18,4	9,5	72,1	$\text{Fe}_3(\text{Al}_{1-x}\text{Si}_x)$	cubic
3	41,8	15,0	43,2	$\text{Fe}(\text{Al}_{1-x}\text{Si}_x)$	cubic
4	66,7	4,2	29,1	$\text{Fe}_2\text{Al}_5$	orthorombic
5	51,5	14,2	34,3	$\tau_1$ $\text{Fe}_3(\text{Al},\text{Si})_5$	triclinic

Abbildung 9: Phasenverteilung in der EDX-Analyse.

Die Bildung der intermetallischen Beschichtung wird durch Fe-Al Interdiffusion gesteuert. Die Diffusion von Fe in Al ist schneller als die von Al in Fe [5]. Dies führt zur Bildung von so genannten Kirkendall-voids [6] an den Grenzflächen von Phasen mit unterschiedlichen Fe-Gehalten zu beobachten sind. Auf Grund des höheren Durchlegierungsgrades könnte dieser Mechanismus für die höhere Oberflächenrauigkeit bei der konventionellen Erwärmung verantwortlich sein. Ein ähnlicher Mechanismus ist aus der Literatur für die Diffusion zwischen Fe und Al bekannt [7, 8].

Durch die EBSD-Analyse konnte in beiden Proben die gleiche Textur bzw. Ausrichtung der Körner ermittelt werden. Dies zeigt, dass die Erwärmungstechnologie keinen Einfluss auf die Diffusionsrichtung hat. Die Unterschiede in der Phasenverteilung und Phasenzusammensetzung sind auf die unterschiedlichen Erwärmungszeiten und die damit zusammenhängenden Durchlegierungsgrade zurückzuführen.

Der Nachweis der Lackierbarkeit wurde durch das Gitterschnittverfahren erbracht. Diese Untersuchungen wurden durch das Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM), Bremen durchgeführt. Erwärmte und in Wasser abgeschreckte Proben wurden mit einem typischen Lackaufbau der Automobilindustrie beschichtet. Im Gitterschnittversuch zeigten die Proben der kombinierten induktiven Erwärmung sowohl direkt nach der Lackierung als auch nach der Salzauslagerung keine signifikanten Unterschiede. Die Eignung des Verfahrens konnte somit nachgewiesen werden.

### 3 Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen

Mit dem Nachweis der industriellen Anwendbarkeit der kombiniert induktiven Erwärmung für Al/Si-beschichtete Bleche konnte das Projekt erfolgreich abgeschlossen werden. Das neu entwickelte

Förderkonzept wurde zum Patent angemeldet und derzeit gibt es bereits erste Gespräche mit Automobilherstellern und Zulieferern über eine weitere Skalierung der Anlagentechnologie, um den Schritt in die Serienfertigung mit entsprechender Prozessfähigkeit zu gewährleisten.

Das Projektkonsortium wird das Thema gemeinsam weiterverfolgen, wobei ein weiterer Partner für die Realisierung des Förderkonzeptes hinzugezogen wird. Das Anlagenkonzept zeigt auch in Bezug auf die Erwärmung von unbeschichteten Blechwerkstoffen interessante Ansatzpunkte. Darüber hinaus entwickeln mehrere Stahlhersteller derzeit neue Beschichtungen für die Anwendung beim Presshärten. Auch für diese Beschichtungssysteme könnte das neue Erwärmungsverfahren eingesetzt werden.

## 4 Ausblick

Die Erkenntnisse aus diesem Projekt können auf verschiedene Themenfelder übertragen werden. So gibt es erste Hinweise, dass sich die Bauteileigenschaften beim Presshärten durch die schnelle Erwärmung positiv beeinflussen lassen. Dieser Aspekt muss jedoch genauer untersucht werden. Weiterhin ist die Wirkung des Verfahrens auf andere Stahlsorten als die derzeit beim Presshärten eingesetzten zu untersuchen, auch hier können sich unter Umständen Potenziale durch superplastische Effekte ergeben.

Kurzfristig sollten die Erkenntnisse aus dem Projekt auf die erst kürzlich auf den Markt gekommenen Beschichtungsmaterialien übertragen werden. Mit der nun zur Verfügung stehenden Anlagentechnologie sind diese Untersuchungen mit geringem Aufwand möglich.

## Literatur

- 
- 1 Paar, U., Becker, H.-H., Alsmann, M.: Press-hardened components from Kassel – chances and challenges. In: Proc. 1st International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, Kassel, Germany, 22.-24. October 2008, S. 153-163.
  - 2 Ghosh, Gautam: Aluminium – Iron – Silicon. Effenberg, Günter, Ilyenko, Svitlana (ed.). SpringerMaterials - The Landolt-Börnstein Database, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008
  - 3 Jiang N, Clum J A, Chromik R R, Cotts E J: Thermal Expansion of Several Sn-based Intermetallic Compounds. Scripta Materialia, Volume 37, Issue 12, 15 December 1997, 1851-1854.
  - 4 V. Raghavan, Al-Fe-Si (Aluminum-Iron-Silicon), Journal of Phase Equilibria and Diffusion Vol. 30 No. 2 2009, 184-188
  - 5 S. Kobayashi, T. Yakou, Control of intermetallic compound layers at interface between steel and aluminum by diffusion-treatment, Materials Science and Engineering A, 338 (2002) 44-53
  - 6 A.D. Smigelskas, E.O. Kirkendall, Zinc diffusion in alpha-brass, Trans AIME 171 (1947) 130-142.
  - 7 D.W. Fan, H. S. Kim, J.-K. Oh, K.-G. Chin, B.C. De Coomann, Coating Degradation in Hot Press Forming, ISIJ International, Vol. 50 (2010), No. 4, 561-568
  - 8 W.-J. Cheng, C.-J. Wang, Observation of high-temperature phase transformation in the Si-modified aluminide coating on mild steel using EBSD, Materials Characterization 61 (2010) 467-473