

Verbesserung der Temperaturngleichmäßigkeit bei der induktiven Bolzenerwärmung durch ein integriertes Prozessmodell

Dipl.-Ing. Simon Künne, Prosik GmbH

Beim Strangpressen von Aluminiumprofilen werden Bolzen mit einer Länge von circa 1,5 m und einem Durchmesser von ungefähr 30 cm durch eine Matrize gepresst. Um diesen Vorgang zu erleichtern werden die Bolzen vor dem Pressen auf etwa 500 °C angewärmt. Eine bewährte Technik hierfür sind Induktionsöfen, in denen die Bolzen einzeln aufgeheizt werden. Dabei werden die Oberflächentemperaturen eines Bolzens mit pneumatisch betriebenen Andrückthermoelementen an mehreren Positionen gemessen und als Regelgrößen für den Prozess verwendet. Diese Art der Messung ist jedoch ungenau. Außerdem ist nichts über die Temperaturverteilung innerhalb des Bolzens bekannt, was eine optimale Prozessführung unmöglich macht.

Daher wurde auf der Grundlage umfangreicher FEM-Simulationen ein in die Anlagensteuerung integriertes Prozessmodell entwickelt, das anhand der elektrischen Leistungsaufnahme der Spulen die induzierte Leistungsdichte im Bolzen und anhand dessen das Temperaturprofil des Bolzens berechnet. Das modellierte Temperaturprofil wird nun anstelle der gemessenen Temperaturen als Regelgröße verwendet. Dieser Ansatz führt zu einer verbesserten Temperaturngleichmäßigkeit innerhalb des Bolzens, zu einer verbesserten Wiederholgenauigkeit von Bolzen zu Bolzen, sowie zu einer Verkürzung der Aufheizzeit durch eine optimale Leistungsführung der Induktionsspulen.

Keywords: Integriertes Prozessmodell, Induktive Bolzenerwärmung, Aluminium

1. Beschreibung des Prozesses

Abbildung 1 zeigt zwei Anlagen zur induktiven Bolzenerwärmung, die zusammen eine Presse mit aufgeheizten Bolzen versorgen. Die von der Säge kommenden kalten Bolzen werden mit Hilfe des Manipulators zunächst auf einer der Kippschalen der beiden Anlagen abgelegt. Parallel zur Kippschale befindet sich auf einem Rollgang die sogenannte Tragschale. Sie dient dazu Bolzen in die Anlage hinein und

wieder herauszufahren. Nachdem ein Bolzen aufgeheizt worden ist und den Ofen verlassen hat, wird er vom Manipulator aufgenommen und zur Presse befördert. Währenddessen wird die Kippschale betätigt und der neue Bolzen rollt auf die Tragschale, die ihn nun in den Ofen fahren kann.

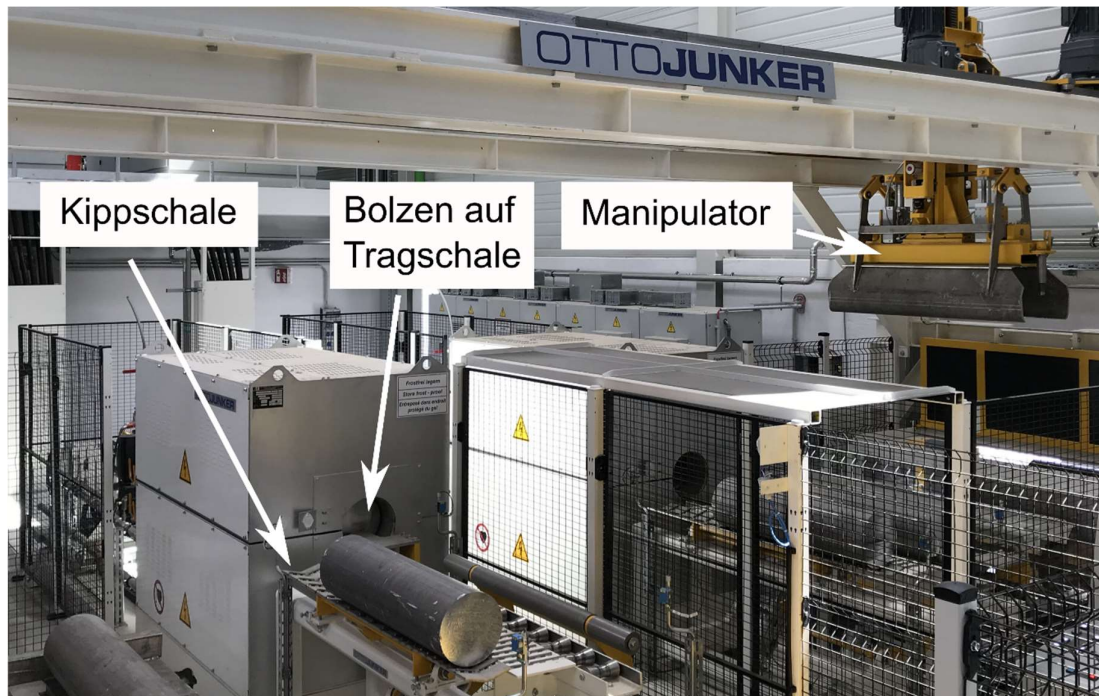


Abbildung 1: Zwei Öfen zur induktiven Bolzenerwärmung

Sobald sich ein Bolzen in der Anlage befindet werden die sechs unabhängig voneinander steuerbaren Induktionsspulen eingeschaltet, die so hintereinander angeordnet sind, dass ein möglichst homogenes elektromagnetisches Feld entsteht. Jede Spule verfügt über einen Kanal, durch den ein Thermoelement auf die Bolzenoberfläche angebracht werden kann. Der Aufheizvorgang von Raumtemperatur auf circa 500 °C dauert etwa 150 Sekunden. Vor der Übergabe des Bolzens an die Presse wird dieser auf einer Messstation abgelegt. Dort kommen ebenfalls Andrückthermoelemente zum Einsatz um die Bolzentemperatur vor dem Pressen noch einmal zu überprüfen. Liegt sie nicht innerhalb der Toleranz wird der Bolzen aussortiert und verschrottet oder zu einem späteren Zeitpunkt erneut erwärmt.

2. Konventionelle Prozessführung

Der Verlauf der gemessenen Bolztemperatur während des Aufheizvorgangs ist zusammen mit der elektrischen Leistungsaufnahme für die vorderste Spule in Abbildung 2 dargestellt. Zunächst wird die Spule mit voller Leistung betrieben. Während

des Aufheizens werden die Thermoelemente immer wieder abgesetzt, da sich der Bolzen ausdehnt und die Elemente sonst Schaden nehmen würden. Nach Erreichen des Sollwertes wird die Leistungsaufnahme der Spule auf die Hälfte begrenzt und eine im Rezept definierte Überziehtemperatur angefahren. Anschließend wird die Temperatur mit einer 2-Punkt-Regelung gehalten. Aufgrund des Skin-Effektes [1] werden über 90 % der Leistung in der äußeren Randschicht des Bolzens bis in eine Tiefe von 20 mm induziert. Da nichts über die Temperaturverteilung im Bolzen bekannt ist, wird beobachtet wie lange zwei Heizvorgänge in diesem Zustand auseinanderliegen. Ab einer gewissen Dauer wird der Bolzen als ausreichend gleichmäßig durchwärmt und damit als abrufbereit für die Presse definiert.

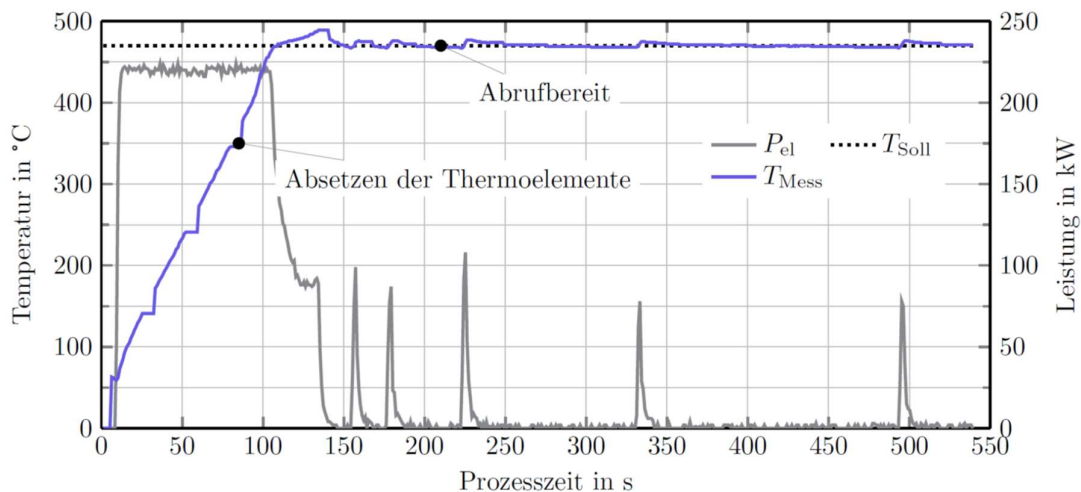


Abbildung 2: Verlauf der gemessenen Bolzentemperatur und der elektrischen Leistungsaufnahme für die vorderste Induktionsspule bei konventioneller Fahrweise

Auch wenn sich die konventionelle Fahrweise seit Jahren bewährt hat, gibt es dennoch einige Schwachstellen, die verbessert werden können. Wegen fehlender Informationen über die Temperaturverteilung im Bolzen kann nicht genau gesagt werden, wann der Bolzen genügend Energie aufgenommen hat um seine Zieltemperatur nach einer kurzen Ausgleichsphase gleichmäßig zu erreichen. Durch die Beobachtung und Bewertung des Temperaturabfalls an der Oberfläche wird hier Zeit verschwendet. Die Überziehtemperatur kann zu hoch gewählt sein, sodass der Bolzen zu heiß wird. Durch die 2-Punkt-Regelung ergibt sich je nach Entnahmezeitpunkt des Bolzens bereits eine Temperaturschwankung von ± 5 K.

Zudem ist die Temperaturmessung nicht ideal sondern fehlerbehaftet. Die Bolzen weisen teilweise sehr unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheiten auf. Das

Spektrum reicht von einer blanken Oberfläche bis hin zu Bolzen mit einer ausgeprägten Gushaut. Um diese durchdringen zu können, müssen die Thermoelemente mit hoher Kraft angedrückt werden. Dies hat zur Folge, dass die Elemente einen Schenkeldurchmesser von 8 mm aufweisen, um den mechanischen Belastungen standzuhalten. Dennoch ist die Kontaktierung aufgrund der unterschiedlichen Bolzenoberflächen und teilweise mangelnder Wartung ungleichmäßig. Dies wirkt sich zusammen mit dem hohen Wärmeabfluss durch die Thermoelemente negativ auf die Qualität der Messung aus [2]. Daher sind in der Praxis teilweise deutlich höhere Temperaturtoleranzen zu beobachten. Die Thermoelemente müssen regelmäßig ausgebaut und angeschliffen werden. Außerdem neigen sie zu einem starken Driftverhalten, welches die absolute Höhe der gemessenen Temperatur mit der Zeit um mehrere Kelvin beeinflusst.

3. Das integrierte Prozessmodell

Ein integriertes Prozessmodell zeichnet sich dadurch aus, dass es in die Software der Anlagensteuerung eingebunden ist und zur Regelung des Prozesses verwendet werden kann. Daher muss für den Simulationsaufwand [3]

$$\mathcal{T} = \frac{t_{swc}}{t_{real}} \ll 1 \quad (1)$$

gelten. Dabei ist t_{swc} die Zeit, die Berechnungen zur Simulation eines Zeitschritts der realen Dauer t_{real} in Anspruch nehmen. Das Modell muss den Prozess also schneller berechnen können als er real abläuft.

Das hier vorgestellte Modell wurde von der Otto Junker GmbH und der Prosik GmbH zusammen entwickelt. Es basiert auf umfangreichen FEM-Simulationen zur Bestimmung der induzierten Leistungsdichte bei verschiedenen Schaltzuständen der Spulen, sowie bei unterschiedlichen Bolzenlängen. Derartige FEM-Simulationen entsprechen dem Stand der Technik [4], jedoch mit $t_{swc} \gg t_{real}$, sodass sie nicht für den direkten Einsatz in einem integrierten Prozessmodell geeignet sind. Zur Lösung dieses Problems wurde ein auf den Ergebnissen der FEM-Simulation basierendes empirisches Modell entwickelt, das die Verteilung der Leistungsdichte mit $\mathcal{T} \ll 1$ ermöglicht.

Die Beschreibung der radialen Verteilung erfolgt nach Gleichung 2. Dabei ist Φ_0 die Leistungsdichte an der Oberfläche, R der Radius des Bolzens und c eine

materialabhängige Konstante. Die ortsabhängige Leistungsdichte $\Phi(r, x)$ zu einem bestimmten Zeitpunkt ergibt sich nach Gleichung 3. Der Schaltzustand der Spulen beeinflusst die Verteilung entlang der Oberfläche $\Phi_R(x)$. Abbildung 3 zeigt den Verlauf von $\Phi_R(x)$ für zwei verschiedene Schaltzustände einmal aus den FEM-Simulationen und einmal aus dem empirischen Modell.

$$\Phi_r = \Phi_0 \cdot e^{-c(R-r)} \quad \text{mit} \quad r \in [0, R] \quad (2)$$

$$\Phi(r, x) = \Phi_r(r) \cdot \Phi_R(x) \quad \text{mit} \quad \Phi_R(x) = \Phi(R, x) \quad (3)$$

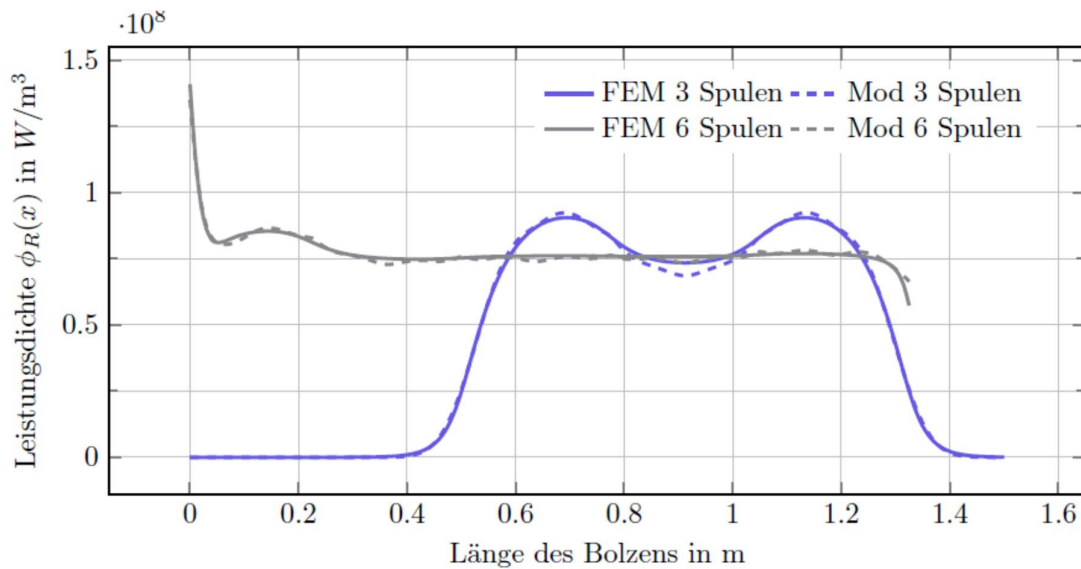


Abbildung 3: Vergleich der berechneten Leistungsdichte nach FEM-Simulation und nach vereinfachtem empirischen Modell

Die Verteilung der Leistungsdichte wird bei der Berechnung jedes Zeitschritts neu berechnet und an ein Finite-Volumen-Modell übergeben. Dieses teilt den Bolzen in Kontrollvolumen ein, die untereinander an den Flächen durch Randbedingungen verknüpft sind. Dies sind vor allem Wärmeleitung innerhalb des Bolzens und freie Konvektion an der Oberfläche und den Stirnseiten. Das FVM-Modell berechnet anhand der Leistungsdichtenverteilung die Temperaturverteilung innerhalb des Bolzens.

Das heißt, für jede Spule sind insbesondere die Temperaturen an der Oberfläche und im Kern des Bolzens bekannt. Weiterhin kann die mittlere Temperatur des Bolzens berechnet werden. Diese ist besonders geeignet, um zu bestimmen, wann der Bolzen genügend Leistung aufgenommen hat um seine Zieltemperatur zu erreichen und sich die noch vorhandenen Temperaturgradienten nur noch ausgleichen

müssen. Die Regelung ist so gestaltet, dass zunächst die erlaubte Überziehtemperatur an der Bolzenoberfläche eingestellt wird. Währenddessen wird die mittlere Bolzentemperatur beobachtet. Nähert sich diese dem Sollwert an, wird die Regelung umgeschaltet und die mittlere Temperatur auf den Sollwert geregelt. Auf diese Weise wird der Bolzen optimal aufgeheizt. Die beschriebenen Zusammenhänge sind in Abbildung 4 schematisch dargestellt.

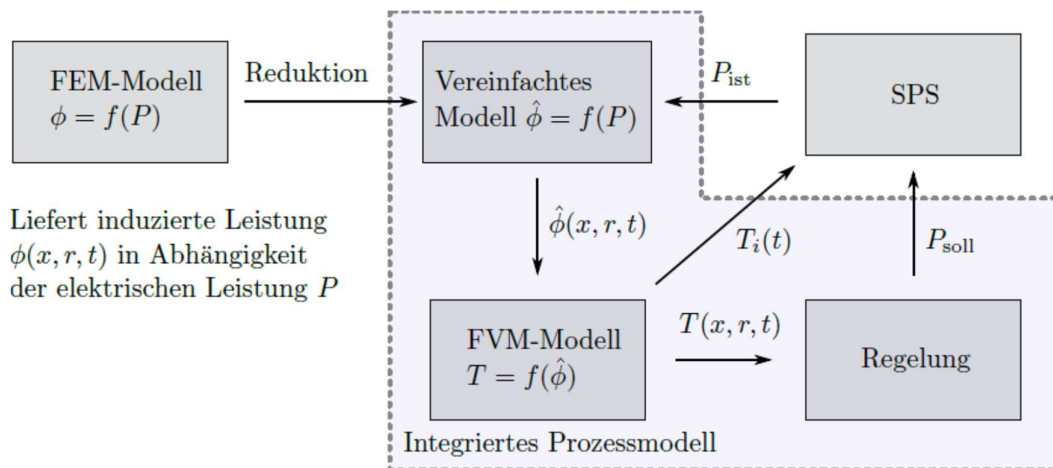


Abbildung 4: Informationsfluss des integrierten Prozessmodells

4. Praxiserfahrungen

Die erste Erprobung des Modells hat 2020 bei der Constellium Singen GmbH stattgefunden. Dort wurde das Modell für die beiden Anlagen aus Abbildung 1 installiert und ausgiebig getestet. Abbildung 5 zeigt den Verlauf der gemessenen Temperaturen und der aufgenommenen elektrischen Leistung für die vorderste der Induktionsspulen. Der Vergleich mit den Verläufen bei klassischer Fahrweise aus Abbildung 2 zeigt, dass durch die neue Regelstrategie eine gleichmäßigere Bolzentemperatur eingestellt wird. Weiterhin kann anhand der mittleren Temperatur exakt bewertet werden, wann der Bolzen abrufbereit ist. So kommt dieses Signal bei modellgestützter Fahrweise bereits nach ca. 150 Sekunden, während es beim konventionellen Ansatz erst nach circa 200 Sekunden gegeben wird. Dies erhöht den Durchsatz der Anlage spürbar.

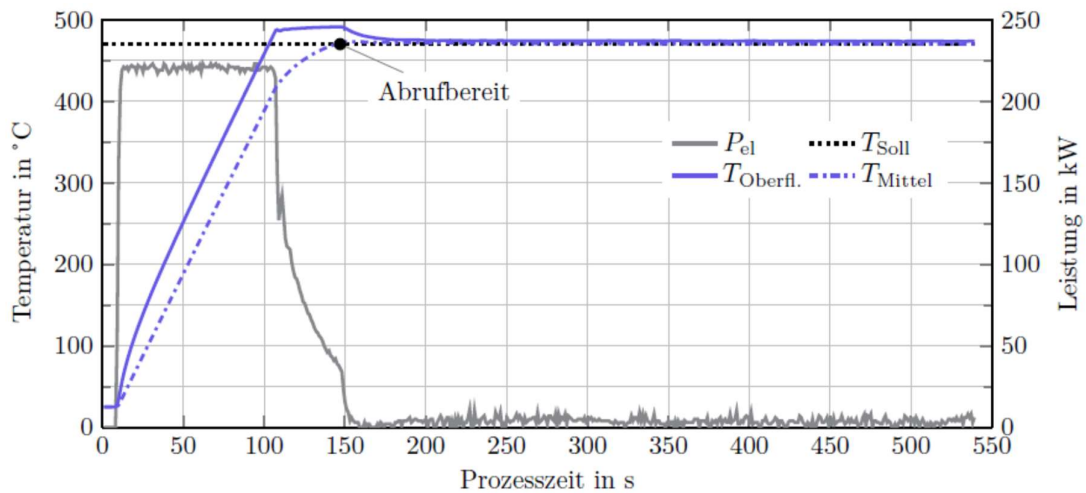


Abbildung 5: Verlauf der berechneten Bolzentemperatur und der elektrischen Leistungsaufnahme für die vorderste Induktionsspule bei modellgestützter Fahrweise

Mit Hilfe der eingangs erwähnten Messstation direkt vor der Presse wird die Temperatur der erwärmten Bolzen noch einmal überprüft. Für ein optimales Pressergebnis ist eine möglichst gleichbleibende Eingangstemperatur der Bolzen gewünscht. Abbildung 6 zeigt die an der Station gemessenen Temperaturen für jeweils 20 aufeinanderfolgende Bolzen einmal im klassischen und einmal im modellgestützten Betrieb. Mit Hilfe des Modells konnte die Wiederholgenauigkeit des Prozesses verbessert werden.

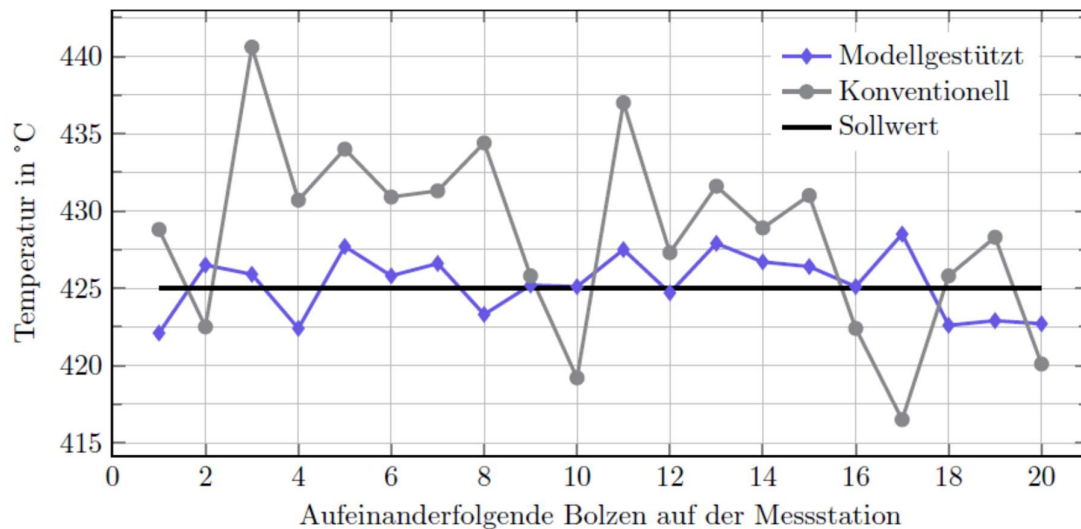


Abbildung 6: Vergleich der Wiederholgenauigkeit bei 20 aufeinanderfolgenden Bolzen für die beiden Betriebsarten

Mittlerweile kommt das Modell auch bei weiteren Kunden zum Einsatz. Es wurden verschiedene Durchmesser erfolgreich behandelt. In Singen kam das Modell bei Bolzen zum Einsatz, die mit Raumtemperatur in die Anlage befördert werden. Bei einem weiteren Kunden wird das Modell eingesetzt, um Bolzen zu erwärmen, die vorher bereits durch einen gasbetriebenen Ofen gelaufen sind. Auch dieses Szenario wird durch das Modell abgedeckt.

5. Zusammenfassung

Die konventionelle Fahrweise der Anlagen für die induktive Bolzenerwärmung hat sich über die Jahre bewährt, ist jedoch mit Nachteilen verbunden. Durch fehlende Informationen über die Temperaturverteilung im Bolzen kann der Prozess nicht optimal gesteuert werden. Ein integriertes Prozessmodell ermöglicht die Berechnung der Temperaturverteilung im Bolzen in Echtzeit parallel zum Prozess. Durch die Anbindung des Modells an die Steuerung der Anlage, können diese Informationen genutzt werden, um den Prozess optimal zu gestalten.

Durch das zusammen mit Otto Junker entwickelte Modell kann die Temperaturgleichmäßigkeit aufeinanderfolgender Bolzen verbessert und die Durchlaufzeit verkürzt werden. Die wartungsintensiven Andrückthermoelemente müssen seltener eingesetzt werden oder können mittelfristig ganz wegfallen. Insgesamt steigt die Prozesssicherheit der Anlage und damit auch die Qualität des Endproduktes.

Literatur

- [1] Jackson, J.D.: *Classical Electrodynamics*. 2nd Edition, Hoboken, New Jersey, Wiley 1975
- [2] Körtvélyessy, D.; Körtvélyessy, L.: *Thermoelement Praxis*. 4. Auflage, Essen, Vulkan-Verlag, 2015
- [3] Wendelstorf, J.: *Prozessmodellierung in der Hochtemperaturverfahrenstechnik*. Habilitationsschrift, Fakultät für Natur- und Materialwissenschaften, Technische Universität Clausthal, 2015
- [4] Aschendorf, B.: *FEM bei elektrischen Antrieben 1*. Wiesbaden, Vieweg + Teubner Verlag 2014