

Optimierung der Prozessführung in der Freiformschmiede

# Energieeffiziente Prozesssteuerung beim Freiformschmieden durch Simulation

Nadine El Kosseifi, Patrice Lasne, Marc Moreno

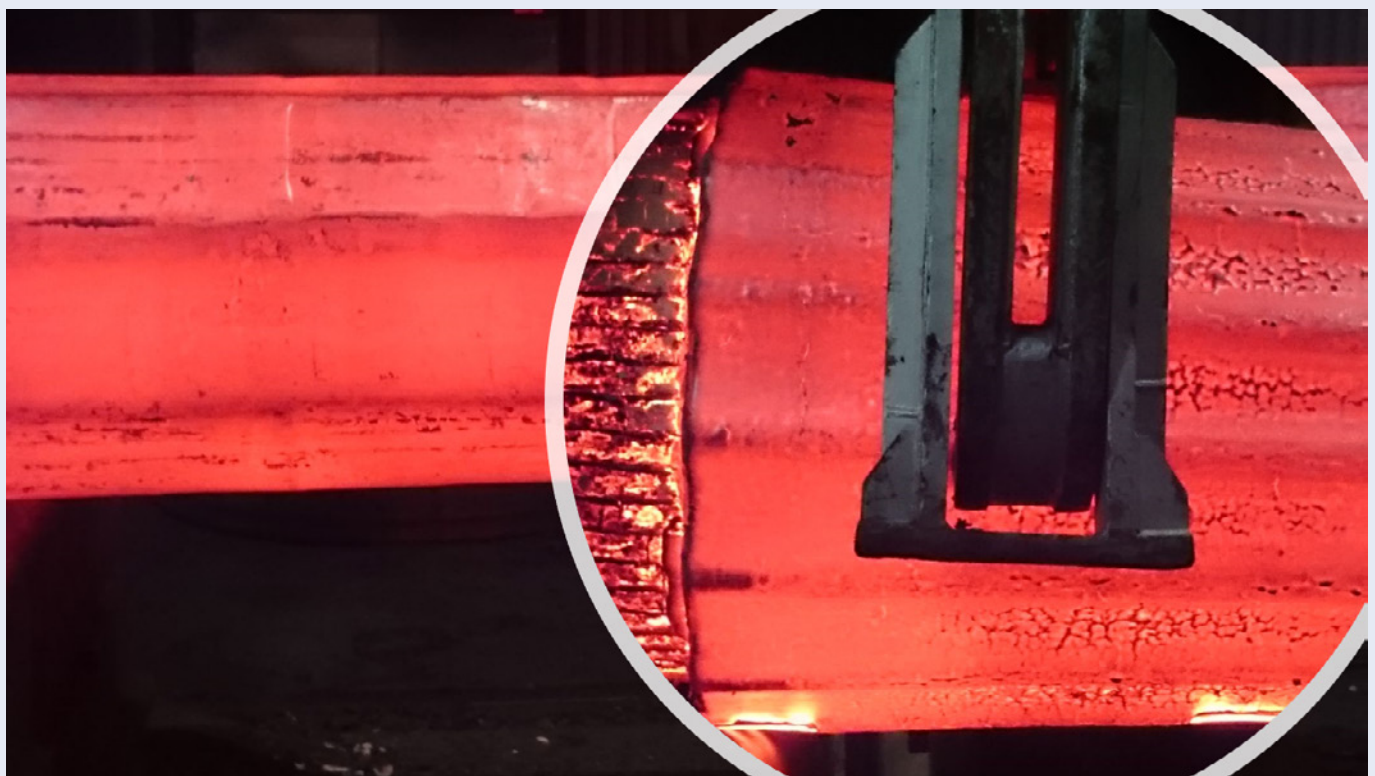
*Freiformschmieden stehen weltweit vor großen Herausforderungen: internationaler Wettbewerbsdruck, CO<sub>2</sub>-Reduzierung zum Schutz des Klimas und steigende Kosten für Gas und Strom. Diese Ziele und Zwänge können nur durch eine Optimierung der Prozessführung in der Freiformschmiede bewältigt werden. Dieser Beitrag soll die Möglichkeiten aufzeigen, die moderne Warm-schmiedesimulationssoftware in Kombination mit der für das Freiformschmieden entwickelten Messtechnik bietet, um den Umformprozess und die Wärmebehandlung noch energieeffizienter zu gestalten.*

## Herausforderungen der Freiformschmiedeindustrie in der Zukunft

Die deutsche Freiformschmiedeindustrie muss sich heute und in Zukunft vielen neuen Herausforderungen stellen. Der hohe Wettbewerbsdruck durch internationale Konkurrenten auf dem Markt für Großschmiedeteile (z.B. Generator- und Turbinenwellen, oder Werkzeugstähle für die kunststoffverarbei-

tende Industrie) hat dazu geführt, dass sicherheitsrelevante Bauteile zunehmend bei ausländischen Freiformschmieden bestellt wurden und werden.

Ausländische Wettbewerber können kostengünstiger produzieren, weil z.B. die Preise für Energie (Strom zum Betrieb der hydraulischen Pressen; Erdgas zum Betrieb der Schmiede- und Wärmebehandlungsöfen) niedriger, die Personalkosten



**Bild 1:** Ansicht eines Freiformschmiede-Verfahrens für ein großes Stahlteil (Quelle: Transvalor S.A.)

geringer sind und die Umweltauflagen (fehlende CO<sub>2</sub>-Bepreisung, niedrige Standards im Emissionsschutz) keine nennenswerten Kosten verursachen.

Im Bereich der Energieversorgung hat sich die Situation für das Freiformschmieden in Europa und insbesondere in Deutschland zuletzt deutlich verschlechtert.

Die Strompreise unterliegen starken Schwankungen (und sind auch im Durchschnitt stark gestiegen), sodass z.B. der Preis an der Leipziger Strombörse (EEX, European Energy Exchange AG) für 1 MWh in der 1. Märzhälfte zwischen 0 € und 700 € schwankte; der durchschnittliche Strompreis pro MWh hat sich gegenüber 2019 fast vervierfacht. Die gestiegenen Beschaffungskosten für elektrische Energie werden daher die Produktion verteuern und sich nachteilig auf den internationalen Wettbewerb auswirken.

Auch die aktuelle Konfliktsituation in Europa trägt zu einem starken - wenn auch vielleicht kurzfristigen - Anstieg der Kosten für die Energieversorgung von Freiformschmieden bei.

Alternative Heiztechnologien für Öfen (z.B. Wasserstoff oder elektrische Beheizung) stehen derzeit nicht zur Verfügung, da sich H<sub>2</sub>-betriebene Öfen noch in der Entwicklungsphase befinden oder elektrische Heizsysteme ineffektiv sind und bestimmte Arten der Wärmebehandlung nicht zulassen.

Daher muss sich die Freiformschmiedeindustrie jetzt und in Zukunft stärker mit den folgenden Fragen befassen:

- Energieeinsparungen im Herstellungsprozess (d. h. Verringerung des Gas- und Stromverbrauchs)
- Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen
- Entwicklung von effizienteren Schmiederouten
- Mehr Materialausbringung pro eingesetztem Gussblock
- Ausschuss-Reduzierung (d.h. Erhöhung der Fehlerfreiheit der Produkte)

### Maßnahmen zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit

Dem Betriebsingenieur der Freiformschmiede oder der Qualitätsplanung stehen heute kurzfristig folgende Möglichkeiten zur Verfügung, um auf die oben genannten Punkte reagieren zu können:

#### Einsparung von Gas beim Einsatz von Schmiedeöfen:

So kann beispielsweise die Restwärme eines Gussblocks beim Aufheizen auf Schmiedetemperatur berücksichtigt werden, wenn die Logistik zwischen Stahlwerk und Schmiedeanlage dies zulässt.

Die Ausnutzung der vorhandenen Wärmemenge im Gussblock trägt dazu bei, dass die notwendige Liegezeit zur Erreichung eines homogen durchwärmten Blockes verkürzt werden kann. Bei den notwendigen Rückwärmern bei mehrtägigen Schmiedungen ergeben sich ebenso Optimierungspotentiale: Die genaue Kenntnis des Energieinhaltes eines Schmiedestücks erlaubt die Festlegung der notwendigen Rückwärmzeit, die die homogene Aufwärmung auf die Schmiedetemperatur sicherstellt.



Bild 2: klassische Freiformschmiedesequenz ausgehend von einem großen Gussblock (Bild: Transvalor)

#### Einsparung von Gas bei der Verwendung von Wärmebehandlungsöfen:

Wärmebehandlungsvorschriften bzw. -kurven können optimiert werden, indem z. B. die Zeiten analysiert werden, die bestimmte Zonen benötigen, um die Austenitisierungstemperatur zu erreichen, oder indem die optimale Haltezeit bestimmt wird. Dies kann mit Thermoelementen, oder kostengünstiger mit der auf Finite Elemente Methode (FEM) basierten Warmumformsimulation geschehen.

#### Entwicklung von effizienteren Schmiederouten:

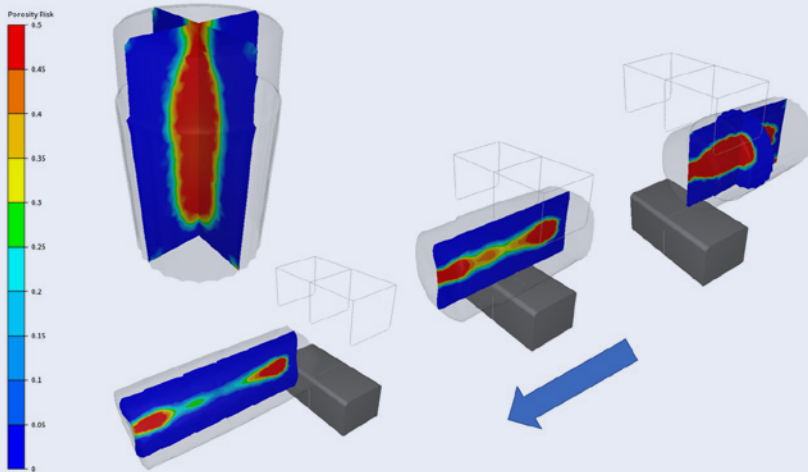
Um die notwendige Umformung bei großen Schmiedestücken zu erreichen, werden seitens des Endkunden, oder durch werksinterne Vorschriften der Schmiede, Mindestumformgrade bzw. Verschmiedungsgrade vorgegeben (meist der Reckgrad bzw. das Verhältnis von Anfangs- zu Enddurchmesser eines Schmiedestückes), um die gewünschten Eigenschaften (meist die sichere Verschmiedung von gießbedingten Lunkern) zu erreichen. Der Verschmiedungsgrad berücksichtigt in keiner Weise die lokale Umformung in dem Bereich, in dem die Verschleißung der Gusslunker stattfinden muss, die aber entscheidend für die Verschleißung der Fehlstellen notwendig ist.

Dazu kommt der Umstand, dass die Wirkung eines Verschmiedungsgrades (VG) nicht einfach von einem kleinen Durchmesser auf einen großen Durchmesser hochskaliert werden kann.

Bei großen Schmiedestücken herrscht die Problematik vor, dass zur Erreichung des gewünschten VG oftmals die Produktionsschritte „Vorschmieden für das Stauchen“ und „Stauchen“ zu einem Schmiedeablauf dazukommen. Dies erhöht die Anzahl der notwendigen Schmiedehitzen und verringert die Ausbringung. Das wiederum erhöht die Produktkosten und schränkt mögliche Dimensionen des Schmiedebauteils ein.

Ziel sollte hierbei sein, Stauchoperationen zu vermeiden, aber trotzdem die geforderte Porenverschleißung sicher zu stellen. Dies kann durch die Betrachtung der Evolution des lokalen Umformgrades und der Materialspannungen bei der Analyse eines Schmiedeablaufes erfolgen.

Auch mehrtägige Schmiedeprozesse ohne Stauchoperationen bieten die Möglichkeiten der Optimierung: beispielsweise können Schmiedeabläufe durch höhere Umformungen pro Hitze vereinfacht werden. Dabei ist aber zu beachten,



**Bild 3:** Porositätsverschluss vom Gießen bis zur 1. Stichfolge (Bild: Transvalor)

dass keine Zerschmiedung oder zu starke Erwärmung des Materials stattfindet, die die Materialeigenschaften ungünstig beeinflussen könnten.

**Mehr Ausbringung pro eingesetztem Gussblock:**

Rückbeziehend auf den vorgehenden Abschnitt kann gesagt werden, dass durch die Vermeidung von Stauchprozessen die Ausbringung erhöht werden kann. Durch ein reines Reckschmieden von z.B. großen Polygonblöcken kann der Materialausfall, der durch das Vorbereiten für den Stauchprozess anfällt, vermieden werden.

**Reduzierung des Ausschusses:**

Bei großen Schmiedebauteilen stellen die gießbedingten Lunker besondere Anforderungen an die Durchführung des Schmiedeprozesses. Die Verschließung der Lunker stellt neben dem Aufbrechen des Gussgefüges und der Einstellung eines feinen Schmiedekorns die größte Aufgabe beim Freiformschmieden dar.

Bei sicherheitsrelevanten Bauteilen wie Dampfturbinen oder Generatorwellen sind unverschlossene Lunker ein abso-

lutes Ausschusskriterium, da diese bei den auftretenden mechanischen Belastungen im Betrieb zu einem Totalausfall des Bauteils, plus der dazugehörigen völligen Zerstörung einer Dampf- bzw. Gasturbine führen können. Daher muss die Sicherstellung der Lunker- und der Porenfreiheit eines sicherheitsrelevanten Bauteils für die Energiewirtschaft bei der Planung eines Schmiedeweges absolute Priorität haben.

**Warmumformsimulation und Gießsimulation als Hilfsmittel beim Freiformschmieden**

In stark wettbewerbsorientierten und sich ständig verändernden Märkten ist die Prozess-Simulation für die Entwicklung und Vorhersage der Lebensdauer hochwertiger

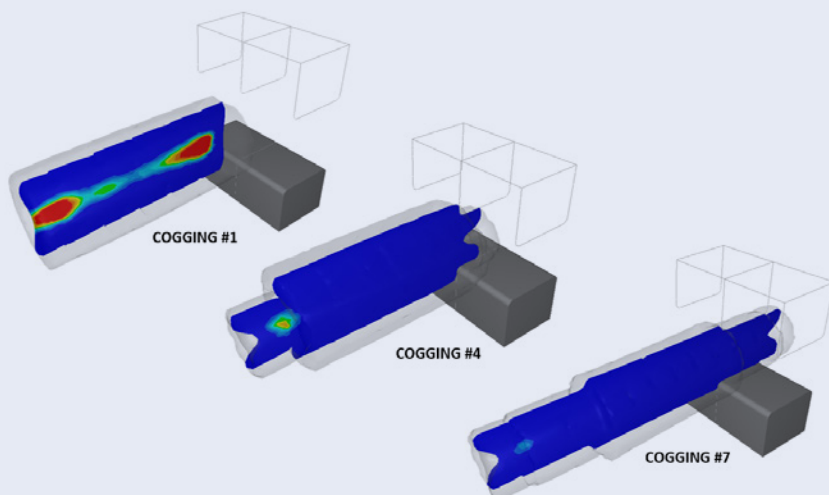
Metallbauteile unerlässlich. Simulationswerkzeuge sind so konzipiert, dass sie die Erwartungen der Hersteller von massivumgeformten Bauteilen in vielen entscheidenden Aspekten erfüllen. Um die Produktqualität und Bauteileigenschaften eines Freiformschmiedeproduktes optimal auszulegen, ist eine gründliche Kenntnis des Herstellungsprozesses vom Gießen über das Schmieden bis zur Wärmebehandlung erforderlich.

In diesem Abschnitt wird auf die Möglichkeiten der Warmumformsimulationssoftware ,Forge NxT<sup>®</sup> und die der Gießsimulationssoftware ,Thercast<sup>®</sup> eingegangen und wie sie Freiformschmiedeprozesse unterstützend und durch einen globalen „End-to-End“-Prozesssimulationsansatz optimieren können.

Die Gießsimulationssoftware Thercast<sup>®</sup> ermöglicht die realitätsnahe Simulation des Gießprozesses von großen Schmiedeblocken. Die Modellierung umfasst die Formfüllung, Erstarrung und Abkühlung. Zu den Simulationsergebnissen gehören unter anderem die Vorhersage von Blockgussfehlern wie Fadenlunker, Porositäten und Seigerungen, aber auch der Wärmehaushalt des Gussblockes, d.h. im Moment des Ziehens des Blockes erhält man die Information der Temperaturverteilung innerhalb des Blockes. Dank der Interoperabilität zwischen den beiden Software-Lösungen kann das Ergebnis der Gießsimulation in Forge NxT<sup>®</sup> in eine Wärmebehandlungssimulation übernommen werden, die den Transport des Gussblockes und die Aufheizung in einem Schmiedeofen berechnet und so die Bestimmung der optimalen Aufheizzeit zulässt. Ebenso kann der Einfluss des Schmiedeprozesses auf die Zone mit Gussporositäten simuliert werden.

Die Kopplung von Gieß- und Umformsimulation bietet somit die Möglichkeit, entscheidende Energieeinsparungen im Bereich der Schmiedeöfen zu realisieren.

Das Ergebnis der Umformsimulation kann wiederum in eine thermische Simulation überführt und zur Ermittlung der notwendigen Nachwärmzeit genutzt werden, die eine homogene Erwärmung des Schmiedestücks für das nächste Schmieden



**Bild 4:** Innerer Porositätsverschluss vom Anfang bis zum Ende des Schmiedeprozesses (Bild: Transvalor)

Transvalor)



gewährleistet - auch diese Anwendung der Simulation kann helfen, Energiekosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren.

**Bild 2** zeigt ein klassisches industrielles Beispiel, bei dem die komplette Freiformschmiedesequenz simuliert wird, einschließlich einer Reihe von aufeinanderfolgenden Erwärmungs- und Transfersphasen bis zum abschließenden Abschreckvorgang.

Modelle, die das Verschließen der Porositäten vorhersagen, basieren auf der Entwicklung des Porositätsumfanges in Abhängigkeit von der Verformung unter Druck oder Zug. Die Vorhersage des Vergleichsumformgrades ist ebenfalls sehr wichtig, da man den Porositätsverschluss auf der Grundlage der berechneten Dehnungswerte beurteilen kann. (**Bild 3**)

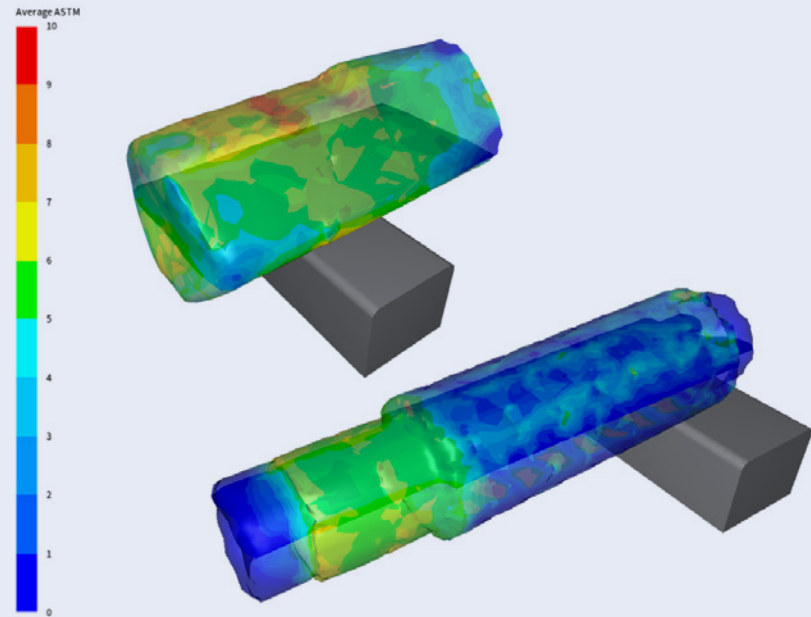
Am Ende des Schmiedeprozesses sind die Materialporositäten fast vollständig geschlossen. An einer Stelle des fertigen Schmiedeteils verbleibt bei diesem Beispiel allerdings noch eine geringe Zone mit Restporosität, die zeigt, dass der Umformvorgang noch optimiert werden kann. (**Bild 4**)

Ein weiteres wichtiges Ziel beim Freiformschmieden ist die Verbesserung der inneren Gefügestruktur des Schmiedeteils. Das Korngefüge und die Korngrößen des aus dem Guss resultierenden Rohteils sind im Allgemeinen nicht mit den für das hergestellte Fertigteil erforderlichen Eigenschaften vereinbar. In erster Näherung stehen das Mikrogefüge und die Verschließung von Porositäten in engem Zusammenhang mit der lokalen Verformung des Schmiedeteils.

Die Simulation ermöglicht die Modellierung von Rekristallisationsphänomenen, die während der Umformstufen (dynamische Rekristallisation) oder während der Transfer- oder Wiedererwärmungsstufen (statische oder metadynamische Rekristallisation) auftreten. Beim Freiformschmieden finden aufgrund des Wechsels der Verformungsphasen und der Wartezeit zwischen den einzelnen Schmiedestufen alle Arten von Rekristallisationen statt. Die nachstehende Simulation (**Bild 5**) zeigt, wie sich der durchschnittliche Korndurchmesser (ASTM) während des Prozesses verändert.

Ist die Schmiedung abgeschlossen, folgt im Allgemeinen eine Wärmebehandlung. Es können eine Vielzahl von Wärmebehandlungsprozessen simuliert werden (z.B. Abschrecken, Glühen, Anlassen, Austenitisieren, etc.). So ist es möglich, das Aufheizverhalten zu berechnen und die notwendige Erwärmungszeit zu bestimmen. Die Simulation erlaubt außerdem den Einfluss der Abschreckmedien zu testen. Die Wärmeübertragung zwischen Schmiedeteil und dem Abschreckmedium muss sehr gut kontrolliert werden, um Defekte wie Verzug und Rissbildung zu vermeiden und gute mechanische Eigenschaften zu erhalten.

Mithilfe der Simulation können neue Schmiedestrategien oder Verbesserungen erprobt werden, z.B. die Überprüfung einer verkürzten Prozessroute. Fragestellungen wie „Reicht die Kraft der Presse für den neuen Schmiedeablauf aus?“, „Wird die Schmiedendtemperatur nicht unterschritten?“ und „Gewährleistet die eingebrachte Umformung die sichere Ver-



**Bild 5:** Entwicklung der durchschnittlichen Korngröße (ASTM) durch den Verformungsprozess (Bild: Transvalor)

schließung der Lunker?“ können mit dem Modell des Schmiedeprozesses untersucht werden.

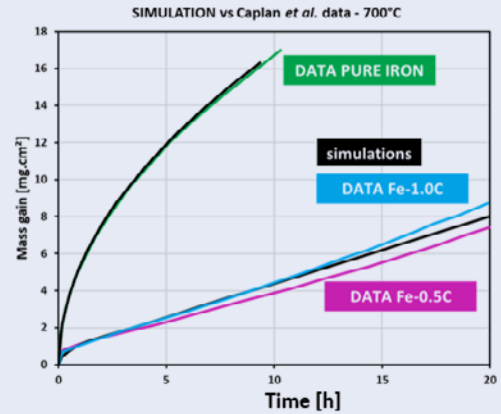
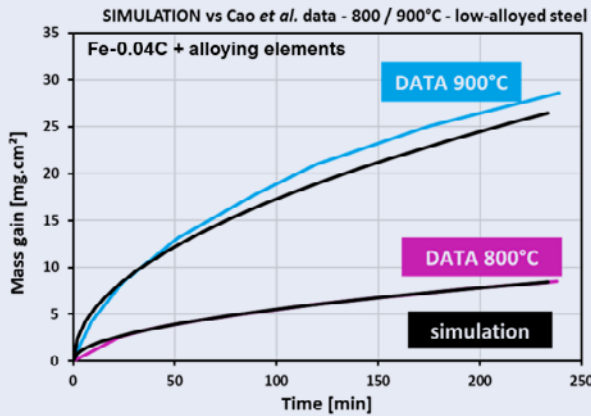
### Neues Modell zur Simulation und Vorhersage der Verzunderung

Es wurde ein neues Modell zur Vorhersage der Schichtdicke und der Masse der Zunderschicht entwickelt, die sich bei Hochtemperaturprozessen auf Stahl bildet. Das Modell ist für das Wachstum von Oxidablagerungen auf reinem Eisen und niedrig legierten Stählen verfügbar. Es umfasst zwei Wachstumsmechanismen (Wachstum durch Diffusion oder Oberflächenabsorption).

Zunder setzt sich aus drei Phasen zusammen: Wüstit (FeO), Magnetit (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) und Hämatit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Bei Temperaturen unter 900 °C ist Wüstit der Hauptbestandteil (~ 95% vol), der die Zundereigenschaften stark bestimmt. Wüstit ist die weichste Phase und aufgrund des hohen Anteils an Fe-Lücken im Kristallgitter (zwischen 5 und 16 % at) besonders löslich für chemische Stoffe.

Der Wüstit-Volumenanteil kann sich jedoch mit der Temperatur (thermodynamische Stabilität) und der Zeit (Diffusion von Elementen durch die Schicht) weiterentwickeln, wobei sich mit zunehmender Sauerstoffkonzentration nacheinander Wüstit, Magnetit und Hämatit bilden. In vielen industriellen Fällen, in denen die Temperatur 900°C übersteigt, wurde beobachtet, dass Wüstit der Hauptbestandteil der Oxidschicht bleibt.

Bei einem durch Sauerstoffdiffusion gesteuerten Wachstum kann das Vorhersagemodell für die Schichtdicke aus der chemischen Reaktion abgeleitet werden. In der Software FORGE® wird eine parabolische Gleichung zur Berechnung der Zunderdicke in cm verwendet, wobei von einer 100%igen Wüstitschicht ausgegangen wird:



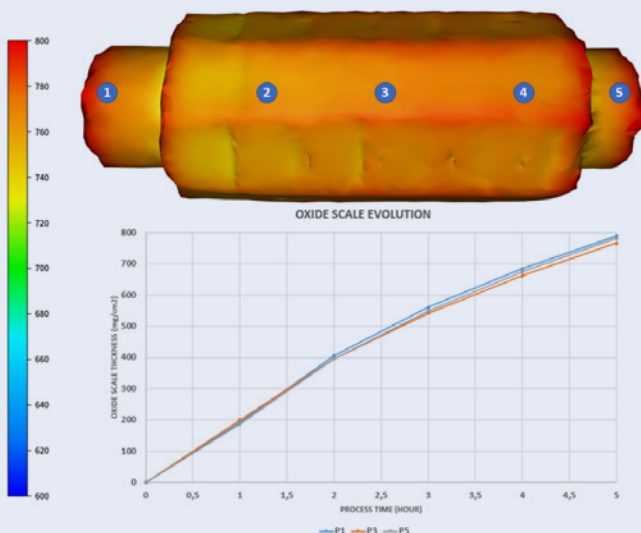
**Bild 6:** Vergleich experimenteller Daten mit Simulationsergebnissen; (a) Caplan et al. für Kohlenstoff Fe-0,5C und Fe-1,0C bei 700°C für 20h. (b) Cao et al. erhalten bei 800° und 900°C

$$x_{FeO} = \frac{1 + \frac{M_{Fe}}{M_O}}{\rho_{FeO}} \times k_e \times \exp\left(-\frac{Q_{scale}}{RT}\right) \sqrt{t}$$

Die Konstante entspricht  $k_e$  gleich 11 (gemäß der Datenanpassung durch Laborexperimente) und  $Q_{scale}$  ist die Aktivierungsenthalpie in  $J \cdot mol^{-1}$ , die je nach Stahlsorte variieren kann. Durch die Änderung des Wertes des Parameters  $Q_{scale}$  lässt sich dieses Gesetz an einen großen Bereich von Stahlsorten oder Ofenatmosphären (niedrige oder hohe  $CO_2$ -Konzentrationen) anpassen.

Es ist zu betonen, dass die experimentellen Charakterisierungen genauer sind, wenn der Massenverlust berücksichtigt wird. Oxidschichten sind nicht kompakt, da verschiedene Defekte wie Risse, Rillen, Poren oder Blasen vorhanden sind. Bleiben diese Defekte unberücksichtigt, können sie zu einer Überschätzung der gemessenen Schichtdicken um mindestens 30 % führen. Aus diesem Grund bieten Messungen, die auf dem Massenverlust basieren, mehr Zuverlässigkeit.

Deshalb werden die Vergleiche zwischen Simulations- und experimentellen Daten im nächsten Abschnitt anhand von Messungen des Massengewinns durchgeführt.



**Bild 7:** Entwicklung der Oxidschicht auf der Oberfläche (in  $mg/cm^2$ )

Wie aus **Bild 6** hervorgeht, zeigen Simulationen und Referenzdaten eine gute Übereinstimmung. Dieser Vergleich unterstreicht die Zuverlässigkeit des Modells für das Oxidwachstum, wenn kurze und lange Zeiträume simuliert werden. Es ist zu betonen, dass in diesem Fall das Wachstum nur durch Diffusion gesteuert wurde.

**Bild 7** zeigt das Schichtwachstum während der Wiedererwärmungsphase, die nach dem vierten Durchlauf stattfindet. Das Schmiedeteil wird 5 Stunden lang bei 1250 °C wiedererwärmt.

### Moderne Messtechnik für das Freiformschmieden

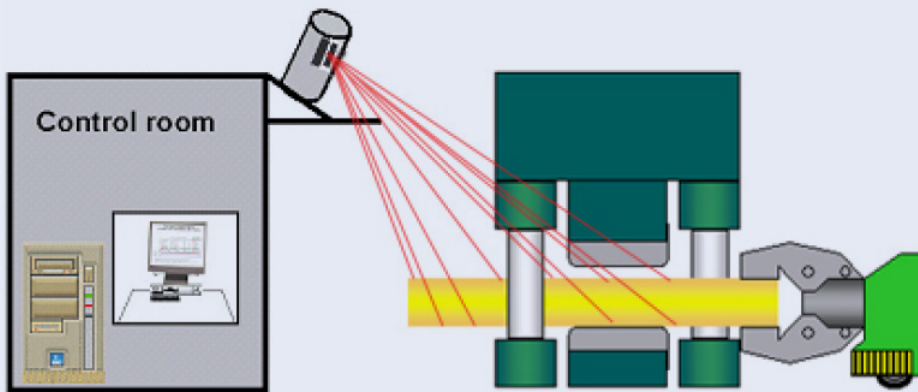
Ein weiterer entscheidender Gesichtspunkt zur Optimierung von Freiformschmiedeprozessen ist das detaillierte Verständnis des Verhaltens der Schmiedeanlage. Aus diesem Grund haben die Hersteller von Anlagen und Softwareherstellern große Anstrengungen unternommen, um die größtmögliche Interoperabilität zwischen Echtzeit-Erfassungssystemen und Simulationssoftware zu gewährleisten.

Die LaCam<sup>®</sup> Forge ist ein Messsystem für Freiformschmieden, das aus zwei Komponenten besteht: einer „Online-Einheit“, die während eines Schmiedevorgangs alle relevanten Prozessdaten (Schmiedekraft, Sattel- und Manipulatorposition, Oberflächentemperatur, etc.) in Form einer Hubtabelle erfasst und gleichzeitig die Verformung in der Kernzone des Schmiedeblocks berechnet. (**Bild 8**)

Die zweite ist ein 3D-Laserscanner, der speziell für heiße Oberflächen und die Umgebungsbedingungen in Stahlwerken entwickelt wurde. Der 3D-Laser kann die Konturen eines Schmiedestücks in 3D erfassen und kann beispielsweise zur Dimensionsmessung oder zur Überprüfung der Geometrie (Geradheit) eingesetzt werden. Die Abstandsmessung basiert auf einer Lichtlaufzeitmessung mit einem gepulsten, in zwei Richtungen abgelenkten Halbleiterlaser. Die Wärmestrahlung wird gemessen und bietet die Möglichkeit, die Oberflächentemperaturverteilung des Werkstücks zu messen.

Das Messsystem kann vor dem Schmieden zur Messung der Oberflächentemperaturverteilung oder zur Markierung von Trennlinien auf dem Block, während des Schmiedens (nach jedem Schmiededurchgang) und nach dem Schmieden zur Messung des Endmaßes oder der Geradheit eingesetzt werden.

So ist es möglich, durch das Messsystem die Kinematikdaten des realen Schmiedeprozesses in die FORGE<sup>®</sup> Software



**Bild 8:** Prinzip des Messsystems (Bild: MINTEQ Ferrotron)

zu übertragen. Beliebige reale Kinematikdaten können so mit Hilfe der leistungsfähigen Skriptsprache „MPFx“ integriert werden, die jede Bewegung (Schmiedeteil und/oder Sattel) präzise beschreibt.

Stichpläne und ihre Auswirkungen auf ein geschmiedetes Bauteil können unter vielen Aspekten analysiert werden: Einfluss der Sattelbreite, Vorschub des Schmiedemanipulators, Höhenabnahme, Anzahl der Stiche, Drehwinkel des Manipulators, usw. Es können der Temperaturverlauf, die lokale Verformung, der Spannungsverlauf, der Kraftverlauf oder eine Wahrscheinlichkeitsangabe zur Porenverschließung. Damit ist es möglich, reale Schmiedeprozesse in einer „virtuellen Schmiede“ abzubilden, zu analysieren und deren Schwachstellen, beispielsweise hinsichtlich des Porenverschlusses, zu identifizieren.

### Voraussetzungen für den erfolgreichen Einsatz der Warmumformsimulation beim Freiformschmieden

Für einen erfolgreichen Einsatz der Simulation zur Prozessoptimierung empfiehlt es sich, einen Betriebsingenieur vor Ort im Freiformschmiede- oder Wärmebehandlungsbetrieb zu haben, der mit den Prozessen des Schmiedens und der Wärmebehandlung vertraut ist, über Grundkenntnisse der Umformtechnik und Werkstoffkunde verfügt und eine gewisse Affinität zur computergestützten Datenanalyse besitzt.

In den letzten drei Jahrzehnten hat sich die Leistungsfähigkeit von Computersystemen vervielfacht, während die Beschaffungskosten gesunken sind, sodass die Beschaffung der Hardware nur noch einen kleinen Teil der Kosten für die Simulationssoftware ausmacht.

Im Bereich der Messtechnik sollte der Zugang zu wichtigen Messdaten in der Freiformschmiede möglich sein, wie zu Oberflächentemperaturen der Schmiedestücke (Pyrometrie oder Thermografie), Schmiedekräften und Schmiedekinematik (z.B. Daten aus der Maschinensteuerung der Presse und des Manipulators), Temperaturen der Schmiede- und Wärmebehandlungsöfen.

Diese Daten sind wichtig für die Erstellung realistischer FEM-Modelle und können auch dazu dienen, die Modelle mit dem realen Prozess zu vergleichen und zu kalibrieren. Dieses mit realen Prozessdaten kalibrierte Modell erlaubt dann die Analyse anderer bestehender Schmiedeprozesse oder bietet die Möglichkeit neue Prozessabläufe in der virtuellen Schmiede zu möglichst geringen Kosten durchzuführen und zu analysieren.

Dieser Ansatz bietet auch einige Vorteile bei der Senkung der Energiekosten: so können Schmiedeversuche bei der Entwicklung neuer Produkte reduziert werden, da mit Hilfe der Simulation ermittelt werden kann, welche Schmiedepläne als sinnvoll anzusehen sind und welche verworfen werden können.

### Fazit und Perspektiven

Angesichts der heutigen Herausforderungen muss die Freiformschmiedeindustrie ihre Technik rasch anpassen, um die durch die globale Klimaerwärmung vorgegebenen ökologischen Ziele zu erreichen und auf den plötzlichen Anstieg der Energiekosten zu reagieren.

Dieser Artikel zeigt, wie effiziente numerische Simulationswerkzeuge zur Bewältigung dieser Herausforderungen beitragen können. So können Verfahreningenieure vorausschauend an innovativen und ehrgeizigen Schmiedestrategien arbeiten. Es können Gieß- und Schmiedeprozesse optimiert werden, um den Gesamtmaterialeinsatz optimal zu gestalten. Es wird eine höhere Produktqualität gewährleistet und die effizienteste Energiebilanz des Schmiedeprozesses ausgearbeitet (Energieeinsparungen/Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung).

Darüber hinaus bietet die Schnittstelle Simulationssoftware FORGE® mit Echtzeit-Messtechnik (LaCam® Forge) die Möglichkeit, Optimierungen des Freiformschmiedeprozesses einfach und schnell zu ermitteln. Sie verschafft der Stahlindustrie damit Vorteile zur Verbesserung der Produktivität und Wettbewerbsfähigkeit und bringt uns mit Sicherheit damit einen weiteren Schritt in Richtung des digitalen Zwillinges.

### Autoren



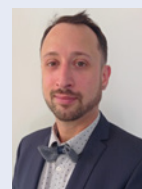
**Dr. Nadine El Kosseifi**

Marketing Product Manager FORGE®  
Transvalor S.A., Biot, Frankreich  
nadine.elkosseifi@transvalor.com



**Patrice Lasne**

Expert Engineering  
Transvalor S.A., Biot, Frankreich  
patrice.lasne@transvalor.com



**Dr. Marc Moreno**

Materials and Development Engineer  
Transvalor S.A., Biot, Frankreich  
marc.moreno@transvalor.com