



Qualität und Zuverlässigkeit

09
2024

Fachwissen für Qualitätsmanagement und Qualitätssicherung

www.qz-online.de



Assets



Standards



Gesetze



CONSENSE



Vorschriften



Anforderungen



Regeln

Consense

**Mehr Resilienz dank
strategischem Compliance-
Management** Seite 36

24 Nachhaltiger glühen
mit Six Sigma



50 Bessere Batterien
mit KI und Vision



Nachhaltig mit Six Sigma

Reduzierung der Energiekosten im Wärmebehandlungsprozess bei Skateboardachsen

Im Rahmen einer Prozessoptimierung mittels Six Sigma wurden Wärmebehandlungsparameter einer modifizierten Aluminiumdruckgusslegierung so optimiert, dass neben der Einhaltung der geforderten Qualität die Gesamtenergiekosten minimiert und zudem anlagenbezogene Kapazitätsengpässe aufgelöst werden konnten.

Prof. Murat Mola

Die Six Sigma Transferfactory der Hochschule Ruhr West am Institut Maschinenbau fokussiert sich auf die praxisorientierte Anwendung von Six-Sigma-Methoden in industriellen Qualitätsmanagementprojekten entlang des gesamten Wertschöpfungsgebietes von Serienfertigungen. In einem der Projekte ging

es um die Optimierung von Wärmebehandlungsparametern einer modifizierten Aluminiumdruckgusslegierung für Skateboardachsen, die im professionellen Sportwettbewerb eingesetzt werden. Als Ausgangslegierung diente die Güte AlCu4TiMg (WS-Nr. 3.1325/EN AW-2014). Ziel der Untersuchung war es, die Gesamtenergiekos-

ten im Wärmebehandlungsprozess zu minimieren und anlagenbezogene Kapazitätsengpässe aufzulösen, ohne die von der Kundschaft geforderten Kundenspezifikationen ($R_p = 300 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$) zu verletzen.

Zur Optimierung des Wärmebehandlungsprozesses wurden polynomiale Re-

gressionsanalysen durchgeführt. Im Rahmen des Regressionsmodellvergleichs erfolgt eine Gegenüberstellung der Anpassungslinien verschiedener Regressionsmodelle (linear, quadratisch, kubisch) mit experimentell ermittelten Daten. Die Residuenanalyse dient der Validierung des Regressionsmodells, während die Zielgrößenoptimierung die prognostizierte optimale Glühzeit bei erhöhter Temperatur darstellt. Die Korrelationsanalysen nach Pearson, die Regressionsanalysen sowie die Modellanpassungen nach dem LSM-Ansatz (Least Squares Method) wurden unter Zuhilfenahme der Statistiksoftware Minitab realisiert.

Die Ausgangslage

Aluminiumdruckgusslegierungen sind für ihre exzellenten mechanischen Eigenschaften bekannt, insbesondere nach einer Wärmebehandlung, die als Ausscheidungshärtung bezeichnet wird. Neben der Legierungszusammensetzung beeinflussen die genauen Zeit-Temperatur-Konstellationen im Rahmen der Ausscheidungshärtung maßgeblich die vom Kunden geforderten mechanisch-technologischen Kennwerte. Die Ausscheidungshärtung besteht aus drei Hauptprozessschritten: Im ersten Schritt erfolgt eine isotherme Auslagerung bei 300°C, um spezifische Legierungselemente in eine übersättigte Mischkristalllösung zu überführen (Homogenisierung). Im zweiten Schritt erfolgt eine schnelle Abkühlung (Abschreckung) in einem auf 70°C vorgewärmten Abschreckmedium. Damit



Durch den isothermen Auslagerungsvorgang kommt es zu thermisch aktivierten Diffusionsprozessen der gelösten Legierungselemente, die zu mikroskopisch feinen Ausscheidungen (Clusterbildung) im Gefüge führen. Die Clusterbildung findet bevorzugt an Versetzungen und Korngrenzen respektive Phasengrenzen statt und blockiert die für eine plastische Verformung notwendige Versetzungsbewegung im Material. © Hochschule Ruhr West / Hanser

werden die Legierungselemente in einer übersättigten Mischkristalllösung gehalten.

Im dritten Schritt erfolgt eine Warmauslagerung der Achsen bei einem Temperaturniveau von 150°C (Warmauslagerung). Durch den isothermen Auslagerungsvorgang kommt es zu thermisch aktivierten Diffusionsprozessen der gelösten Legierungselemente, die zu mikroskopisch feinen Ausscheidungen (Clusterbildung) im Gefüge führen. Die Clusterbildung findet bevorzugt an Versetzungen und Korngrenzen respektive Phasengrenzen statt

und blockiert die für eine plastische Verformung notwendige Versetzungsbewegung im Material. Die Parameter Glühzeit und Haltetemperatur beeinflussen dabei maßgeblich die Morphologie und Kohärenz der Clusterbildung im Gefüge, wodurch das mechanisch-technologische Eigenschaftsprofil der Achsen definiert werden kann.

Methodik

Im Rahmen des ersten Themenschwerpunkts wurde die Genauigkeit unterschiedlicher Regressionsmodelle in einem Validierungsprogramm bewertet. Im Rahmen des zweiten Themenschwerpunkts wurde mithilfe einer Zielgrößenoptimierung die numerische Vorhersage der optimalen Glühzeit in Abhängigkeit von der zu erwartenden Festigkeitsänderung untersucht. Die praktische Anwendbarkeit der theoretisch prognostizierten Prediktoreinstellung wurde durch eine Validierung mit realen Prozessdaten überprüft. Eine Energiebilanz wurde aufgestellt, um das Energieeinsparpotenzial zu quantifizieren.

Ergebnis

Im Rahmen der Untersuchung wurde eine Korrelationsanalyse zwischen Glühzeit und Materialstreckgrenze mittels des Pearson-Korrelationskoeffizienten durchgeführt. Die durchgeführte Korrelationsanalyse zeigte mit einem Korrelationskoeffi- »

Methode

Korrelationstyp Pearson
Anzahl der verwendeten Zellen 90
p: paarweise Korrelation nach Pearson

Korrelationen

	Glühzeit [min]
Festigkeit [MPa]	0,993

Paarweise Korrelationen nach Pearson

Stichprobe 1	Stichprobe 2	N	Korrelation	95%-KI für p	p-Wert
Festigkeit [MPa]	Glühzeit [min]	90	0,993	(0,989; 0,995)	0,000

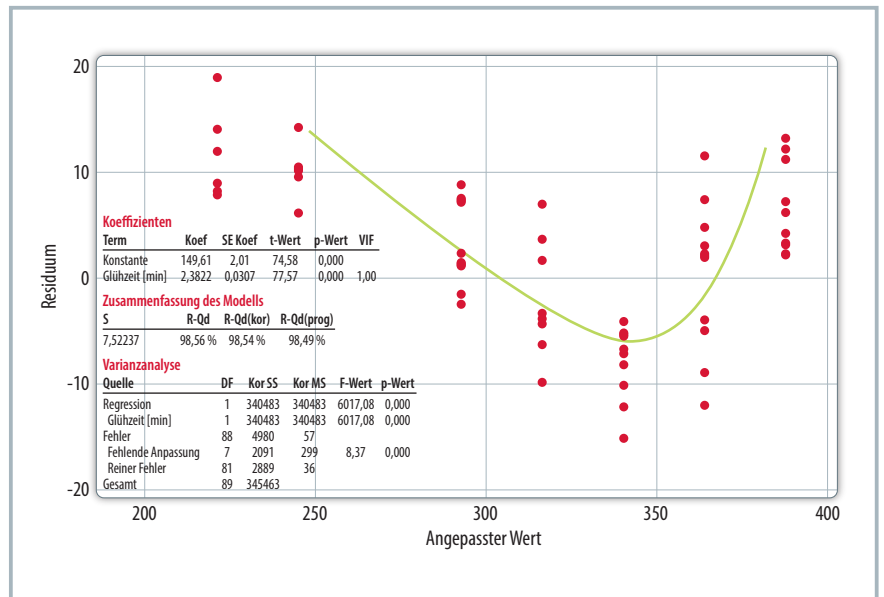
Im Rahmen der Untersuchung wurde eine Korrelationsanalyse zwischen Glühzeit und Materialstreckgrenze mittels des Pearson-Korrelationskoeffizienten durchgeführt. Die durchgeführte Korrelationsanalyse zeigte mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,993 eine signifikante ($p = 0,00; = 0,05$) positive Korrelation (KI = 0,989; 0,995). © Hochschule Ruhr West / Hanser

zienten von 0,993 eine signifikante ($p = 0,00$; $\alpha = 0,05$) positive Korrelation ($KI = 0,989$; $0,995$).

Es wurden verschiedene Regressionsmodelle unterschiedlicher Polynomgrade miteinander verglichen. Das lineare Modell weist eine hohe Modellpräzision auf ($R^2\text{-linear} = 98,56\%$), jedoch zeigt die zugehörige nicht beschreibbare Reststreuung (Residuenstreuung) im relevanten Betriebsbereich ein ausgeprägtes U-förmiges Profil als Indikator für das Vorhandensein nicht-linearer Beziehungen. Das kubische Modell besitzt die höchste Modellgüte ($R^2\text{-kubisch} = 98,92\%$) und erfüllte auch alle Anforderungen an die Residuenstreuung.

Das kubische Modell diene anschließend im Rahmen der Zielgrößenoptimierung als Grundlage, die optimale Glühzeit für eine erhöhte isotherme Auslagerungstemperatur von bisher 300°C auf 350°C zu prognostizieren. Die Prognose der Glühzeit ergab eine Dauer von rund 64 Minuten. Das 95%-Konfidenzintervall für die Antwortvariable R_p erstreckt sich über einen in Bezug auf die geforderten Kundenspezifikationen sicheren Bereich von 297,86 bis 302,14 MPa (95%-PI: 286,75; 313,25 MPa).

Die Ergebnisse zeigen, dass die von der Kundschaft geforderte mittlere Streckgrenze von $300\text{ MPa} \pm 20\text{ MPa}$ mit hoher Sicherheit ($1-\alpha = 95\%$), auch bei einer um 80 % reduzierten Glühzeit erreicht wird, wenn gleichzeitig die Glühtemperatur von ursprünglich 300°C auf 350°C erhöht wird.



Das lineare Modell weist eine hohe Modellpräzision auf ($R^2\text{-linear} = 98,56\%$), jedoch zeigt die zugehörige nicht beschreibbare Reststreuung (Residuenstreuung) im relevanten Betriebsbereich ein ausgeprägtes U-förmiges Profil als Indikator für das Vorhandensein nicht-linearer Beziehungen.

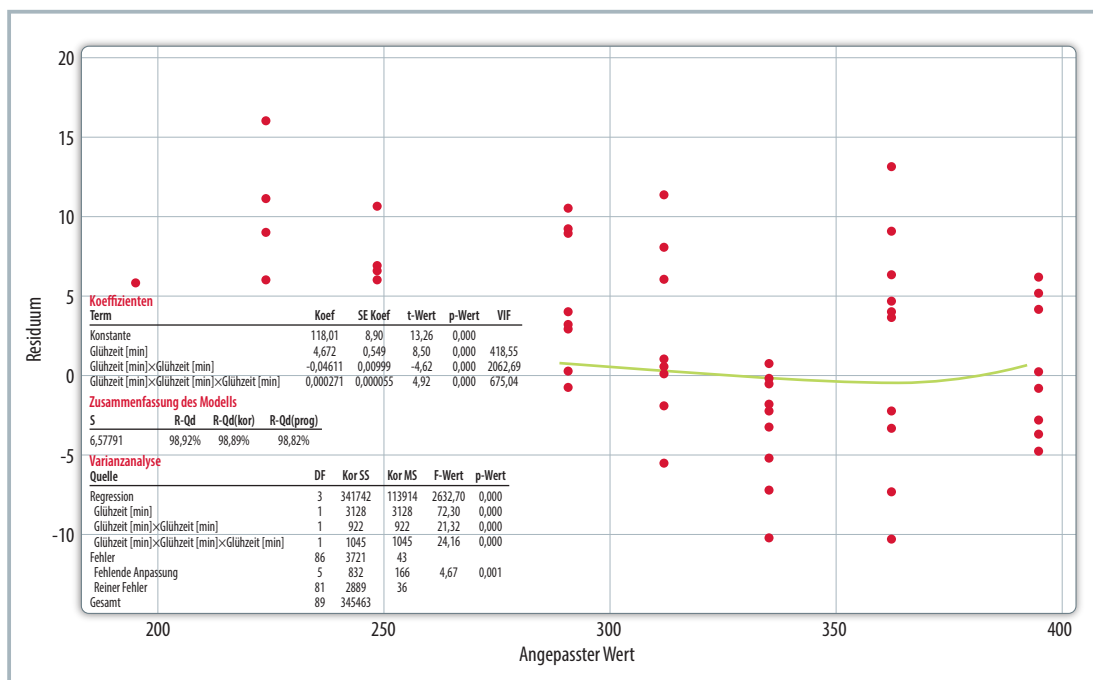
© Hochschule Ruhr West / Hanser

Die zugehörige betriebswirtschaftliche Betrachtung der Gesamtenergiebilanz zeigt, dass trotz einer erforderlichen Erhöhung der Glühtemperatur von ursprünglich 300°C auf 350°C eine Gesamtenergieeinsparung von 76,22 % realisiert wird.

Die aufgrund dieser Prozessoptimierung zusätzlich erzeugten positiven monetären Effekte (z.B. durch Kapazitätssteigerung und Senkung der Produktionsgesamtkosten) ergeben sich aus der logischen Konsequenz.

Zusammenfassung

Im Rahmen eines Six-Sigma-Projekts konnte auf Basis eines präzisen Regressionsmodells eine effiziente Zielgrößenoptimierung realisiert werden. Trotz einer Steigerung der Prozesstemperatur konnte durch eine signifikante Reduktion der Glühzeit eine Reduzierung der Gesamtenergiekosten von rund 76 % erreicht werden, ohne dabei die von den Kunden geforderten Spezifikationsgrenzen bezüglich der Materialstreckgrenze zu verletzen.



Das kubische Modell besitzt die höchste Modellgüte ($R^2\text{-kubisch} = 98,92\%$) und erfüllte auch alle Anforderungen an die Residuenstreuung.

© Hochschule Ruhr West / Hanser

Parameter

Antwort	Ziel	Untergrenze	Soll	Obergrenze	Gewichtung	Bedeutung
Streckgrenze [MPa]	Soll	183	300	401	1	1

Lösung

Lösung	Glühzeit [min]	Streckgrenze [MPa] Anpassung	Zusammengesetzte Erwünschtheit
1	64,4299	300,000	1,00000

Mehrere Antwortprognosen

Variable	Einstellung			
Glühzeit [min]	64,4299			
Antwort	Anpassung	SE Anpassung	95 %-KI	95 %-PI
Streckgrenze [MPa]	300,00	1,08	(297,86; 302,14)	(286,75; 313,25)

Das kubische Modell diente im Rahmen der Zielgrößenoptimierung als Grundlage, die optimale Glühzeit für eine erhöhte isotherme Auslagerungstemperatur von bisher 300°C auf 350°C zu prognostizieren.

© Hochschule Ruhr West /
Hanser

eigenen Unternehmen noch erhebliches Potenzial zur Energieeinsparung und Prozessoptimierung vorhanden ist. ■

Fazit: Diese Untersuchung verdeutlicht das erhebliche Potenzial, das viele Unternehmen in eigener Hand haben. Neben den an vielen Stellen berechtigten Unternehmensforderungen nach Steuererleichterungen und anderen Begünstigungen durch Staat und Institutionen liegt nach wie vor viel Potenzial im eigenen Betrieb,

um die hohen Herausforderungen der aktuellen Energiekrise zu bewältigen.

Unternehmen sollten insbesondere in besonders herausfordernden wirtschaftlichen Zeiten mutig noch konsequenter als bisher den Fokus auf ihre eigenen nicht wertschöpfenden Tätigkeiten legen. Diese Untersuchung zeigt unstrittig auf, dass im

INFORMATION & SERVICE**AUTOR**

Prof. Murat Mola ist an der Hochschule Ruhr West tätig und wurde im Jahr 2023 für seine praxisnahe Six-Sigma-Lernfabrik „Six Sigma Transferfactory“ und für seine Entwicklung der Minitab-Lernplattform „Tabtrainer“ mit dem Titel „Deutschlands Professor des Jahres“ in der Kategorie „Ingenieurwissenschaften/Informatik“ ausgezeichnet. Die von ihm konzipierten und durchgeführten Hochschulmodule für die Green-Belt- und Black-Belt-Ausbildung sind deutschlandweit die einzigen, die alle strengen internationalen Kriterien der ISO 13053 erfüllen und daher als einzige Hochschule durch den TÜV Nord Cert für eine industriebezogene Six-Sigma-Zertifizierung gemäß ISO 13053 erfolgreich zertifiziert wurden.

KONTAKT

Prof. Dr.-Ing. Murat Mola
Lehrgebiet Six Sigma-Qualitätsmanagement & Werkstoffwissenschaften
Hochschule Ruhr West
Duisburger Straße 100
45479 Mülheim an der Ruhr
T +49 172 699 663-0
murat.mola@hs-ruhrwest.de
www.tabtrainer.com

Gesamt-Energiebilanz Vorher/Nachher

Chargengewicht: 35 kg (100 Achsen)
Umgebungstemperatur: 20 °C
Energieleistung für Halten bei 300 °C: 100 kW
Energieleistung für Halten bei 350 °C: 116,67 kW

Benötigte Aufheizenergie:

20°C → 300°C: $Q_{300^\circ\text{C}} = m \cdot c \cdot (300 - 20) = 35 \text{ kg} \cdot 0,896 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \cdot 280^\circ\text{C} = 8.780,8 \text{ kJ}$
20°C → 350°C: $Q_{350^\circ\text{C}} = m \cdot c \cdot (350 - 20) = 35 \text{ kg} \cdot 0,896 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \cdot 330^\circ\text{C} = 10.332,8 \text{ kJ}$

Benötigte Halteenergie:

300°C/5 h → $E_{\text{Halten, 300}^\circ\text{C}} = P_{\text{Halten, 300}^\circ\text{C}} \cdot 5 \cdot 3.600 = 100 \text{ kW} \cdot 5 \cdot 3.600 \text{ s} = 1.800.000 \text{ kJ}$
350°C/1 h → $E_{\text{Halten, 350}^\circ\text{C}} = P_{\text{Halten, 350}^\circ\text{C}} \cdot 1 \cdot 3.600 = 116,67 \text{ kW} \cdot 1 \cdot 3.600 \text{ s} = 420.012 \text{ kJ}$

Gesamt-Energieverbrauch:

Vor der Prozessoptimierung: $E_{\text{alt}} = Q_{300^\circ\text{C}} + E_{\text{Halten, 300}^\circ\text{C}} = 8.780,8 \text{ kJ} + 1.800.000 \text{ kJ} = 1.808.780,8 \text{ kJ}$
Nach der Prozessoptimierung: $E_{\text{neu}} = Q_{350^\circ\text{C}} + E_{\text{Halten, 350}^\circ\text{C}} = 10.332,8 \text{ kJ} + 420.012 \text{ kJ} = 430.344,8 \text{ kJ}$

Prozentuale Energieeinsparung:

$(E_{\text{alt}} - E_{\text{neu}}) \cdot 100 = (1.808.780,8 \text{ kJ} - 430.344,8 \text{ kJ}) \cdot 100 = 76,22 \%$

Die betriebswirtschaftliche Betrachtung der Gesamtenergiebilanz zeigt, dass trotz einer erforderlichen Erhöhung der Glühtemperatur von ursprünglich 300°C auf 350°C eine Gesamtenergieeinsparung von 76,22 % realisiert wird. © Hochschule Ruhr West / Hanser