



Indirekte Bestimmung der Temperaturverteilung von induktionserwärmten Halbzeugen

Die genaue Temperaturführung bei der induktiven Erwärmung von Halbzeugen vor dem Schmiedeprozess ist von großer Bedeutung, um kritische Prozessgrößen beim Umformvorgang einhalten zu können. Hierbei stellt die homogene Durchwärmung des Stangenquerschnitts einen wichtigen Parameter dar, um zum Beispiel ein gleichmäßiges Gefüge im Bauteil nach der Umformung gewährleisten zu können. Die Messung der Temperaturverteilung im Stangenquerschnitt ist jedoch unter Produktionsbedingungen nur schwer umsetzbar, weshalb in diesem Beitrag ein Vorgehen zur indirekten Ermittlung hierfür vorgestellt wird.

AUTOREN



Daniel Schöner, M.Sc.

ist Produktentwickler bei der Neumayer Tekfor GmbH in Hausach und Doktorand am Institut für Umformtechnik (IFU) der Universität Stuttgart



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Mathias Liewald MBA

ist Direktor des Instituts für Umformtechnik (IFU) der Universität Stuttgart



Dr.-Ing. Holger Näckel

ist Qualitätsdirektor der Tekfor Gruppe in Hausach



Annika Schweizer, B.Eng.

war zum Zeitpunkt der Untersuchungen Bachelorandin bei der Neumayer Tekfor GmbH in Hausach

Durch ständig wachsende Anforderungen an die ressourcenschonende Herstellung von Schmiedeprodukten steht bei Neumayer Tekfor unter anderem der energieaufwendige Induktionserwärmungsprozess vor der Warmmassivumformung im Fokus.

Wichtige Prozessmerkmale hierbei sind die kontrollierte Temperaturführung in Verbindung mit einer möglichst konstanten Temperaturverteilung über dem Querschnitt der eingehenden Stangenabschnitte. Diese Merkmale sind für die Umformbarkeit der Schmiedeteile, die Werkzeugstandzeiten und schließlich für die geometrische Produktqualität von großer Bedeutung. Besonders bei temperaturempfindlichen Stählen, die zum Beispiel zur Randentkohlung oder zu unerwünschten Gefügeumwandlungen neigen, muss der Induktionsprozess beherrscht und gut verstanden sein. Unter Kosten- und Umweltaspekten hat die Energiemenge, welche für die induktive Erwärmung benötigt wird, einen entscheidenden Einfluss auf den Energieverbrauch und die damit verbundene CO₂-Emission.

Bei Neumayer Tekfor liegt das Rohmaterial überwiegend in Stangenform vor und wird bei kontinuierlichem Vorschub durch mehrere Induktionsspulen bis zur Schmiedepresse geführt (Bild 1).

Spätestens zum Zeitpunkt der Umformung soll eine bestimmte Endtemperatur des Rohteils homogen über dem Querschnitt des Schmiedehalbzeuges vorliegen. Während des Erwärmungsprozesses kann jedoch mit herkömmlichen Messmitteln unter Produktionsbedingungen lediglich die Oberflächentemperatur der Stange beziehungsweise des Rohteils ermittelt werden.



Bild 1: Induktionserwärmungsanlage mit vier Spulen vor einer Warm Schmiedepresse

Zur Beschreibung und Auslegung der Induktionserwärmungsanlage und der erforderlichen Heizleistung stehen heute diverse Rechenmodelle und Simulationen zur Verfügung [1], [2]. Eine Vielzahl an dazu notwendigen Werkstoff- und Maschinendaten ist jedoch unbekannt oder nur schwer zu ermitteln. Eine direkte Messung mit einem Thermoelement im Kern des Rohteils ist aufgrund der teilweise mehrere Meter langen Induktionsanlagen nur schwer umsetzbar.

In diesem Beitrag wird eine Methode zur indirekten näherungsweisen Bestimmung der Temperaturverteilung über dem Querschnitt des Rohteils vorgestellt, die auch auf ähnliche Fragestellungen in der Praxis übertragbar ist. Hierzu werden die verschiedenen Gefügestände, die sich während der Erwärmung bzw. nach dem Abschrecken gemäß ZTA- beziehungsweise ZTU-Schaubild des verwendeten Stahls einstellen, herangezogen. Im Rahmen dieser Studie wurde der übereutektoide Stahl 100Cr6 gewählt, da der nach dem Abschrecken des Rohteils verbleibende Restaustenit (ab C-Gehalte > 0,6 %) relativ genaue Aussagen zum Gefügestand bei der metallographischen Analyse ermöglicht. Zusätzlich enthält der Stahl 100Cr6 im Zustand vor der Induktionserwärmung Anteile von Sekundärzementit, dessen Auflösung bei der Erwärmung gemäß dem ZTA-Schaubild [3] hinreichend genaue Aussagen zum erreichten Temperaturniveau über die A_m -Temperatur erlaubt [3], [4].

GRUNDLAGEN ZU INDUKTIONSERWÄRMUNG UND GEFÜGEARTEN

Die induktive Erwärmung zählt zu den direkten Erwärmungsmethoden und bildet mit einer Leistungsübertragung von 300 000 kW/m² eine heute in der Praxis üblicherweise eingesetzte, effiziente Methode, um Rohteile aus Stahl zu erwärmen [5]. Die Werkstoffkennwerte, welche zur mathematischen Beschreibung des Erwärmungsprozesses durch Induktion notwendig sind, lassen sich unterteilen in temperaturabhängige Größen wie Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, spezifischer elektrischer Widerstand und magnetische Permeabilität sowie in die temperaturunabhängige Materialdichte. Hinzu kommen anlagenspezifische Kenngrößen, die den Prozess beeinflussen oder mit denen dieser geregelt werden kann. Hierzu zählen insbesondere Spulenspannung, Frequenz des Wechselfelds, Windungsanzahl der Spule, Kopplungsabstand, Geometrie der Spule und Vorschubgeschwindigkeit.

Bei der Induktionserwärmung sorgt der Skin-Effekt dafür, dass sich eine höhere Stromdichte an der Außenfläche eines zylindrischen Rohteils als im Inneren seines Volumens

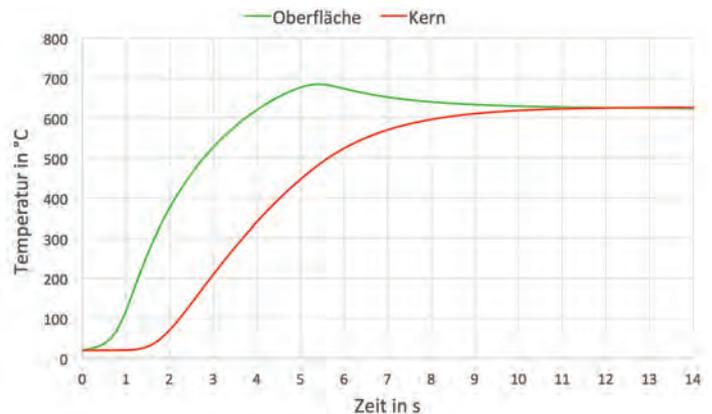


Bild 2: Simulierte Aufheizkurve von Oberfläche und Kern einer induktionserwärmten zylindrischen Probe (ø 20 mm) aus einem unlegierten Vergütungsstahl

einstellt. Dies führt dazu, dass bis zu einer werkstoff- und anlagenabhängigen Eindringtiefe rund 86 Prozent der Energie im randnahen Bereich in Wärme umgesetzt werden. Lediglich 14 Prozent der eingebrachten Energie werden im Inneren des Zylinders in Wärme umgesetzt [6]. Aufgrund der Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Kern bewirkt lediglich der Effekt der Wärmeleitung, dass sich die Wärme transient nach innen ausbreitet und das Rohteil homogen durchwärmt wird. Beide Temperaturverläufe nähern sich mit der Zeit an, was im Detail mittels Verhältnisgleichungen [6] berechnet werden kann und exemplarisch in Bild 2 dargestellt ist.

Das hier beschriebene Vorgehen setzt werkstoffliche Kenntnisse zum Zeit-Temperatur-Umwandlungsverhalten der Stähle sowohl beim Erwärm- (ZTA-Schaubild) als auch beim Abkühlvorgang (ZTU-Schaubild) voraus. Die in den Schaubildern aufgeführten Umwandlungspunkte und weitere Begrifflichkeiten sind in [4] standardisiert und können vom Stahlhersteller bereitgestellt werden.

Des Weiteren sind Kenntnisse über auftretende Phasen im vorliegenden Stahlwerkstoff notwendig, deren einzelnes Auf-

Zustand	Temperaturbereich	Gefügestand	Härtewerte
1	20 °C – 750 °C	Perlit und Sekundärzementit (SZ)	300 HV10 – 500 HV10
2	750 °C – 850 °C	Perlit, SZ und Martensitanteile	500 HV10 – 700 HV10
3	850 °C – 1000 °C	Lattenmartensit	700 HV10 – 900 HV10
4	1000 °C – 1100 °C	Plattenmartensit	650 HV10 – 850 HV10
5	> 1100 °C	Plattenmartensit und größere Restaustenitanteile (lichtmikroskopisch erkennbar)	650 HV10 – 850 HV10 Bereiche mit Restaustenit: weich 500 HV10 – 750 HV10

Tabelle 1: Zusammenhang zwischen Temperaturbereich und Gefügestand an Proben aus 100Cr6

treten oder das Vorliegen in Form von Phasenmischgebieten als Gefüge charakterisiert wird. Hierzu gehören für die Stähle der Warmmassivumformung üblicherweise Martensit, Bainit, Perlit, Ferrit und Austenit, die wiederum in spezielle Untergruppen unterteilt werden und in [4] definiert sind:

Abschnitt 3.3.9 – Tabelle 1: Ferrit, Austenit, Zementit, grob- und feinlammellarer Perlit, oberer und unterer Bainit, Martensit (angelassen und nicht angelassen);
Abschnitt 3.137: Latten- und Plattenmartensit;
Abschnitt 3.218: Widmannstaetten

ERMITTLUNG VON TEMPERATURBEREICHEN WÄHREND DER ROHTEILERWÄRMUNG – ANALYSE DES RESULTIERENDEN GEFÜGEZUSTANDS IM STATIONÄREN BETRIEB

Um die Methode zur indirekten Bestimmung unter Produktionsbedingungen durchführen zu können, wurden vorab mehrere Versuche im stationären Betrieb, unter Variation der Temperaturen (500 – 1200 °C) und der Erwärmungszeiten (10 – 30 Sek.), durchgeführt. Die verwendeten zylindrischen Proben (ø 35 mm) aus 100Cr6 wurden unmittelbar nach dem Erwärmungsvorgang in Wasser abgeschreckt. Die Versuche erfolgten an einer Induktionsanlage mit einer Spulenwindung und ohne Materialvorschub (stationärer Betrieb), wodurch man zusätzlich zur Oberflächen- auch die Kerntemperatur durch ein Thermoelement aufzeichnen konnte. Durch die Messung der beiden Temperaturen konnte untersucht werden, welchen Einfluss die Erwärmung auf die Gefügeausbildung nach dem Abschrecken der Proben an der Oberfläche und im Kern hatten.

In Tabelle 1 sind die mit dem Lichtmikroskop ermittelten Gefügestände und die aus den Temperaturmessungen zugeordneten Temperaturbereiche aufgeführt. Die Untersuchungen der Proben haben ergeben, dass sich die tatsächlich gemessenen Temperaturen an der Oberfläche und auch im Kern des Rohteils eindeutig den Gefügeständen in der Tabelle zuordnen lassen. Somit kann eine nennenswerte Beeinflussung durch den zeitlich versetzten Temperaturausgleich von Oberfläche zu Kern ausgeschlossen werden. Die Versuchsreihen wurden mehrfach wiederholt, um die Genauigkeit des Verfahrens zu bestimmen. Danach kann von einer Streuung von nur ca. ± 25 °C an den Phasenübergängen der einzelnen Bereiche ausgegangen werden.

Die in der Tabelle genannten Härtewerte sind aufgrund eines möglichen Phasenmixes jedoch nur bedingt aussagefähig. Die hinreichend genaue Bestimmung der Temperaturbereiche kann somit relativ zuverlässig über den Gefügestand des erkaltenen Schmiedebauteils ermittelt werden. Im Temperaturbereich unterhalb von 750 °C zeigte sich keine Gefügeumwandlung nach der Induktionserwärmung, wodurch das Ausgangsgefüge (hier

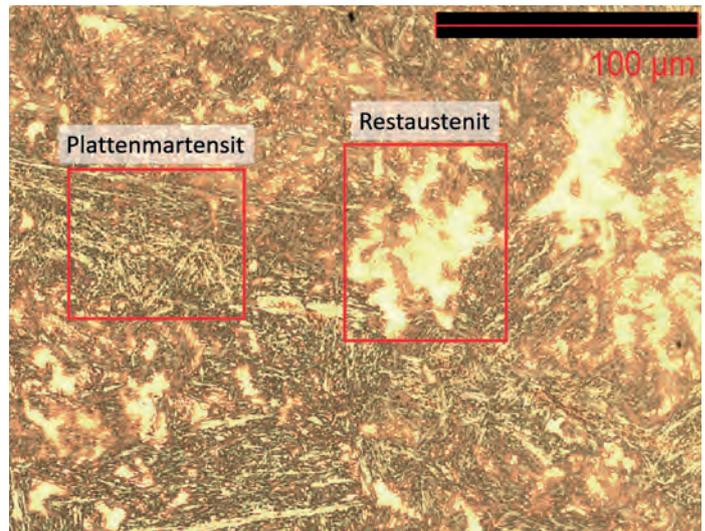


Bild 3: Lichtmikroskopische Aufnahme von Plattenmartensit mit Restaustenit im Kern einer 100Cr6 Probe (Vergrößerung 500:1)

Perlit und Sekundärzementit), bestehen blieb. Ab zirka 750 °C haben sich erste Austenitbereiche gebildet, wobei die vollständige Umwandlung des perlitischen Ferrits in Austenit erst mit Erreichen der A_3 -Temperatur abgeschlossen ist [3] [4]. Die eigentliche eutektoide Temperatur A_1 liegt bei 723 °C [4], dieser Umwandlungspunkt des perlitischen Ferrits in Austenit hat sich jedoch zu höheren Temperaturen in Abhängigkeit von der Erwärmungsgeschwindigkeit verschoben [3], [4]. Das Erreichen einer Temperatur oberhalb von 1100 °C konnte indirekt dadurch festgestellt werden, dass der ursprünglich vorhandene Sekundärzementit vollständig aufgelöst wurde (A_m -Temperatur [3], [4]). Im Ergebnis der nachfolgenden Wasserabschreckung entstand aus diesem Austenitzustand ein Mischgefüge aus Plattenmartensit und lichtmikroskopisch deutlich erkennbarem Restaustenit ohne Sekundärzementit (Bild 3). Durch die Verschiebung der Umwandlungspunkte in Abhängigkeit von der Aufheizgeschwindigkeit ist bei der Bestimmung der Temperaturbereiche im stationären Betrieb darauf zu achten, dass diese Untersuchungen mit den gleichen Aufheizraten wie unter Produktionsbedingungen durchgeführt werden.

VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UNTER PRODUKTIONS-BEDINGUNGEN

Zur Durchführung der Versuche unter Produktionsbedingungen wurden spezielle Proben aus 100Cr6 mit den Abmessungen ø 20 x 100 mm angefertigt und auf eine präparierte Trägerstange mit Passstift aufgesteckt. Mithilfe der Stange wurden die Proben durch eine Induktionsanlage mit drei Spulen transportiert und konnten zu jeder Zeit entnommen und in Wasser abgeschreckt werden. Um die Einflüsse der

Versuchsreihe	1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	3.2
Windungszahl je Induktionsspule	20 – 32 – 27		32 – 32 – 27		32 – 32 – 32	
Vorschub [m/s]	0,06	0,04	0,06	0,04	0,06	0,04
Temperatur nach Spule 1 [°C]	986	985	817	816	867	868
Temperatur nach Spule 2 [°C]	1065	1100	983	990	1075	1100
Temperatur nach Spule 3 [°C]	1260	1260	1260	1260	1260	1260
Leistung [kW]	246	175	232	166	236	169
Spannung [V]	562	481	581	494	615	526

Tabelle 2: Versuchsplan unter Serienbedingungen an einer Induktionsanlage mit drei Spulen

Anlagen- und Erwärmungsparameter auf die Temperaturverteilung über dem Stangenquerschnitt zu ermitteln, wurden die Windungszahl bzw. die auswechselbaren Spulen, der Vorschub und die Spulenspannung variiert (Tabelle 2). Die drei Parameter wurden ausgewählt, da diese im direkten Zusammenhang mit der Aufheizgeschwindigkeit und der Durchwärmungszeit stehen und somit maßgeblich den Induktionserwärmungsprozess beeinflussen. Die Oberflächentemperatur der Proben wurde nach Spule 3 konstant bei 1260 °C gehalten, wohingegen die Temperaturen nach Spule 1 und Spule 2 von der Anlage geregelt wurden.

Die Tabelle zeigt zudem, dass sich je nach Spulenvariante die Temperaturen nach den Induktionsspulen 1 und 2 sowie die für die Erwärmung aufgebrachte Leistung veränderten. Die Vorschubgeschwindigkeit hatte im untersuchten Bereich keinen wesentlichen Einfluss auf die Oberflächentemperatur. Auf Basis der beschriebenen Methode und der ausgewählten prozessrelevanten Parameter wiesen die Proben nach dem Abschrecken an den jeweiligen Spulen verschiedene Gefügestände beziehungsweise Härtewerte über dem Querschnitt auf.

ERGEBNISSE UND POTENZIALE IM SERIENBETRIEB

Die Laborauswertungen der Gefügestände in Tabelle 3 zeigen deutlich, dass sich nach Spule 3 in allen Proben an der Oberfläche (O) sowie im Kern (K) größere Restaustenitanteile, aber keinerlei Sekundärzementit mehr feststellen ließen. Dies bedeutet, unter Berücksichtigung des ZTA-Schaubilds für diesen Werkstoff (A_m -Temperatur [3]), dass gemäß Tabelle 1 im Kern eine Temperatur von über 1100 °C vorlag und somit

eine maximale Temperaturdifferenz von 160 °C zur Oberfläche vorhanden war. Die Ergebnisse konnten durch zweimalige Durchführung der einzelnen Versuchspunkte verifiziert werden.

Vergleicht man die metallographisch ermittelten Ergebnisse nach Spule 1, 2 und 3, so kann nach jeder Spule ein Anstieg des Temperaturniveaus festgestellt werden. Bei genauer Betrachtung von Oberflächen- und Kerntemperatur stellt man fest, dass diese sich nach Spule 1 für alle Versuchsreihen unterscheiden, da offensichtlich nicht genug Zeit für den Temperatúrausgleich vorhanden war. Nach Spule 2 wird dieser Effekt geringer und ist schließlich nach der dritten Spule nicht mehr feststellbar. Besonders bei Versuchsreihe 2.1 und 2.2 war nach Spule 1 im Kern ein rein perlitisches Gefüge mit Sekundärzementit vorhanden, was auf eine Temperatur unterhalb 750 °C hinwies, da keine Umwandlung stattfand. Die Härteverläufe von Proben, die nach Spule 1 entnommen wurden, verdeutlichen diese Ergebnisse (Bild 4). In Versuchsreihe 1.1 und 1.2 ist ein durchgehendes Härteniveau zu erkennen, wohingegen Versuchsreihe 2.1 und 2.2 im Kern zweifelsfrei auf Perlit schließen lässt.

Durch diese indirekte Beurteilung der Temperaturverteilung im Rohteilquerschnitt konnten im Laufe der Versuchsreihe die spezifisch effizientesten Anlagenparameter bestimmt werden. Beim Vergleich der verschiedenen Versuchsreihen konnten, bei gleicher homogen verteilten Endtemperatur und einer Vorschubgeschwindigkeit von 0,06 m/s, letztlich Leistungsbedarfe zwischen 236 kW und 246 kW ermittelt werden. Dies bedeutet, dass eine mögliche Einsparung von rund 4 Prozent, bei zuvor nicht optimal gewählten Prozessparametern, möglich

Versuchsreihe	1.1		1.2		2.1		2.2		3.1		3.2	
Position	O	K	O	K	O	K	O	K	O	K	O	K
Spule 1	3	2	3	2	3	1	3	1	3	2	3	2
Spule 2	3	3	4	3	3	3	3	3	4	3	4	4
Spule 3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

Tabelle 3: Auswertung der Versuchsreihen mit Gefügeständen; 1: Perlit und Sekundärzementit; 2: Perlit, Sekundärzementit und Martensitanteile; 3: Lattenmartensit; 4: Plattenmartensit; 5: Plattenmartensit und größere Restaustenitanteile; O: Oberfläche; K: Kern

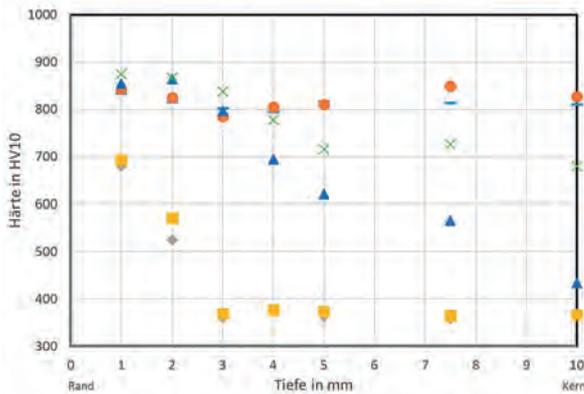


Bild 4: Härteverläufe über den Querschnitt der Versuchsproben

wurde. Aufgrund der hohen Verlustleistungen solcher Induktionsspulen kann weiter untersucht werden, welche Spulenzahl und welche Leistungsaufnahme für die Erwärmung von Halbzeugen tatsächlich erforderlich ist. Somit können weitere Energieeinsparungen durch den Entfall nicht notwendiger Spulen generiert werden.

AUSBLICK

Im Rahmen dieser Veröffentlichung wurden neben den hier vorgestellten empirisch ermittelten Ergebnissen auch mehrere Simulationsmodelle mit dem Programm DEFORM-HT erstellt. Die in diesem Zusammenhang durchgeführten Simulationen zur Bestimmung der Temperaturverteilung im Rohteil sowie Gefügeumwandlungen stimmten mit den Ergebnissen der oben beschriebenen stationären Versuche näherungsweise überein. Da die Ermittlung der Materialeigenschaften aufwendig ist, wurde mittels Variation verschiedener Materialparameter iterativ untersucht, inwiefern sich die Aufheizkurve, die Durch-

[1] Nacke, B; Baake, E.: 2014, Induktives Erwärmen: Wärmen, Härten, Glühen, Löten, Schweißen, Vulkan Verlag GmbH

[2] Lupi, S; Forzan, M; Aliferov, A.: 2015, Induction and Direct Resistance Heating, Theory and Numerical Modeling, Heidelberg, New York, Springer International Publishing Switzerland

[3] Orlich, J; Rose, A; Wiest, P.: 1973, Zeit-Temperatur-Austenitisierungs-Schaubilder, Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle, Hrsg. Max-Planck-Institut für Eisenforschung in Zusammenarbeit mit der TU Berlin und dem Werkstoffausschuß des VDEh, Band 3, Düsseldorf.

[4] ISO 4885:2018: Ferrous materials – Heat treatments – Vocabulary

[5] Benkowski, G.: 1990, Induktionserwärmung. Härten, Glühen, Schmelzen, Löten, Schweißen, VEB Verlag Technik

[6] Davies, J; Simpson, P.: 1979, Induction Heating Handbook, Maidenhead, McGraw-HILL Book Company.

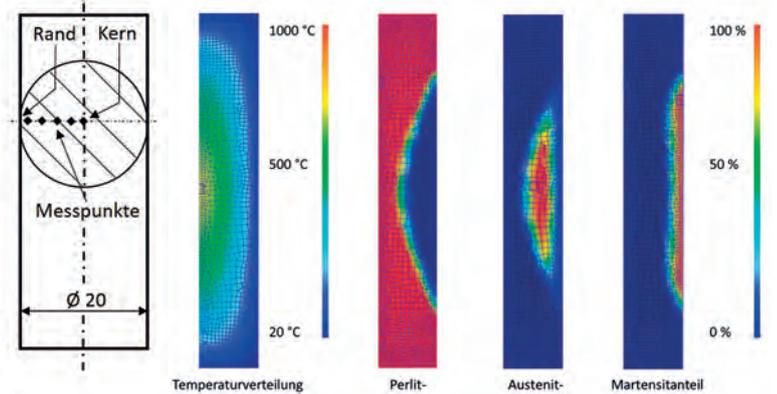


Bild 5: Simulierte Temperaturverteilung und Gefügeanteile an einer zylindrischen Probe (ø 35 mm) aus 100Cr6 Bilder: Autoren

wärmzeit und die Gefügeanteile verändern und sich den stationär ermittelten Ergebnissen annähern. In Bild 5 sind exemplarische Simulationsergebnisse zur Temperaturverteilung eines Stangenabschnitts aus 100Cr6 und zu den sich einstellenden, berechneten Gefügeanteilen dargestellt.

Um die Simulation für zukünftige Prozessauslegungen verwenden zu können, müssen zur Bestimmung der Haupteinflussfaktoren weitere Parameterstudien sowohl simulativ als auch experimentell durchgeführt und aufeinander abgestimmt werden.

ZUSAMMENFASSUNG

Durch die Ermittlung von Temperaturbereichen und den entsprechenden Gefügeständen lässt sich für diverse Stähle die Temperaturverteilung über dem Querschnitt indirekt bestimmen. Versuche mit dem übereutektoiden Stahl 100Cr6 haben ergeben, dass sich je nach Spulenanordnung, Vorschub und Zwischentemperaturen verschiedene Gefügestände einstellen, die mit entsprechenden Härtewerten korrelieren. Bei untereutektoiden und eutektoiden Stählen, die einen C-Gehalt unter 0,8 Prozent aufweisen, ist dieses Vorgehen ebenfalls zielführend. Eine solche Vorgehensweise erfordert jedoch eine fundierte Betrachtung der sich einstellenden Gefügestände im Zusammenhang mit dem ZTA- und ZTU-Verhalten. Durch die in dieser Veröffentlichung beschriebenen Methode ist es möglich, die spezifisch effizientesten Anlageneinstellungen zu ermitteln und dadurch die Bauteilqualität und Werkzeugstandzeiten zu verbessern und mögliche Potenziale für die tatsächlich benötigte Energiemenge zu ermitteln. Des Weiteren können mit diesem Vorgehen etablierte Modelle, die in kommerziellen FE Codes im Pre-Processing zur Auswahl angeboten werden, überprüft und parametrisiert werden.

i Neumayer Tekfor GmbH
 Hinterer Bahnhof 17
 77756 Hausach
 Tel.: +49 7831 808-0
 E-Mail: info@tekfor.com
 Internet: www.tekfor.de