

Innovation durch adaptive Frequenzvariation im Induktionshärten

Innovation via adaptive frequency variation in induction hardening

Alexander Ulferts, Frank Andrä

Die passende Frequenz für einen Härteprozess zu finden, kann mit vielen Problemen behaftet sein. Es wird ein Verfahren diskutiert, welches die Nachteile bisheriger Systeme mit statischen Frequenzen umgeht und die Vorzüge eines neuen Erwärmungsansatzes anhand zweier Fallstudien einprägsam erläutert. Der gezeigte Härteprozess kann über eine adaptive Frequenzanpassung reproduzierbar an die Gegebenheiten des Werkstücks angepasst werden.

Finding the right frequency of a hardening process can be a hard task. In this article a process will be discussed which obviates the disadvantages of present systems with static frequencies and illuminates the amenity of a new heating approach by two case studies in a demonstrative manner. The pointed hardening process can be adapted to the conditions of the workpiece by an adaptive frequency adaption.

Einleitung

Die Fähigkeit, die Frequenz und Leistung eines induktiven Härteprozesses unabhängig voneinander im laufenden Prozess über eine CNC Ansteuerung zu verändern erfüllt einen lang ersehnten Traum vieler Induktions-Wärmebehandler, stellt dieser Ansatz doch die größte Flexibilität in einem Erwärmungsprozess bereit. Dies war der Hintergrund der Entwicklung des neuen, zwangsgeführten Umrichters STATITRON IFP (Independent Control of Frequency and Power), welcher den Anwender in die Lage versetzt, die Frequenz im Bereich von 5 bis 40 kHz bei einer maximalen Leistung von 480 kW (Single Module System) stufenlos zu regeln.

Das neue Konzept des IFP erweitert die Möglichkeiten der Wärmebehandlung vieler Werkstücke durch die Vorgabe einer zeitgesteuerten Frequenz- und Leistungskurve deutlich, werden durch diesen Ansatz doch die Effektivität des Prozesses wie auch die Qualität des Erwärmungsbildes deutlich gesteigert. Die Prozesse sind hierbei nicht auf Härtean-

wendungen beschränkt; Temperprozesse profitieren in gleichem Maße von den Möglichkeiten der Frequenzadaption und der Möglichkeit, die Wärmebehandlung an einem einzigen Umrichter durchzuführen. In diesem Artikel werden zwei Fallstudien vorgestellt, die zum einen die Grenzen und Problematiken der klassischen Ansätze aufzeigen und zum anderen die Vorzüge der neuen Technologie in Bezug zu den Wärmebehandlungsverfahren herausarbeiten.

Es existieren eine Vielzahl unterschiedlicher Typen von Induktoren zum Härten von Stahl, abhängig von der Geometrie des zu behandelnden Bauteils, des gewünschten Härtebildes, den Beschränkungen der Applikation selbst, wie auch der Art der Erwärmung zum Beispiel einer Ganzflächen- oder partiellen Vorschubhärtung. Grob gesagt lassen sich alle Induktoren in drei Kategorien einordnen: Scan-, Single-Shot- und Spezial-Induktoren. Da sich die gesamte Bandbreite der Anwendungen schwer in einem Artikel abdecken lässt, sei die Diskussion der Vorzüge, die die IFP-Technik

bietet, auf progressive Härteprozesse beschränkt.

Induktoren für Scanprozesse existieren sowohl mit einer wie auch mit mehreren Windungen. Je breiter oder länger der Induktor und größer somit der Wirkungsbereich des Induktors ausgeprägt ist, umso höher lässt sich die Vorschubgeschwindigkeit auslegen.

Einwindungs-Induktoren werden vorwiegend in Anwendungen eingesetzt, die ein scharfes Härtebild erfordern. Dieser Induktorentyp wird meist aus vollen Kupferblöcken gefräst, um zum einen die Lebensdauer und Standzeit auf hohem Level zu halten und zum anderen die Präzision und Reproduzierbarkeit der Härteergebnisse sicherzustellen. Mehrwindungsspulen werden vorwiegend aus Kupferrohr in einem manuellen Prozess gelötet. Die Abschreckbrause wird zum Teil direkt in den Induktor eingelassen. Alternativ wird eine separate Brause nachgeführt.

Hintergrundinformation: Induktionshärten

Die Wärmebehandlung durch Induktion erfolgt durch Beaufschlagung einer Induktorspule mit einem Wechselstrom. Der Induktorstrom führt zur Ausprägung eines elektrischen und magnetischen Wechselfeldes, welches im zu behandelnden Werkstück Wirbelströme induziert. Durch den elektrischen Widerstand des Werkstücks erzeugen diese Wirbelströme Wärmeverluste, die das Werkstück aufheizen. Die Erwärmung ist dabei abhängig vom Quadrat der fließenden Ströme (I^2R). Die Maximalwerte der Stromdichte treten an der Oberfläche des Werkstücks auf. Das Phänomen der ungleichmäßigen Verteilung der Ströme wird auch als Skineffekt bezeichnet.

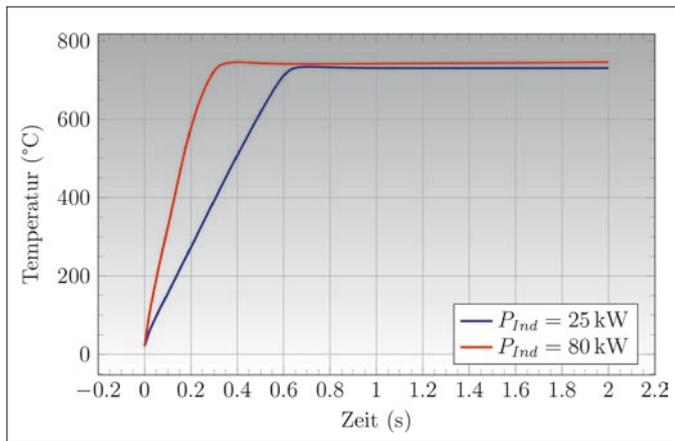


Bild 1: Fehlanpassung des Härteprozesses einer 5 mm Welle bei einer Induktorfrequenz von 10 kHz

Fig. 1: Current cancellation effect at a hardening process of a shaft of 5 mm at an inductor frequency of 10 kHz

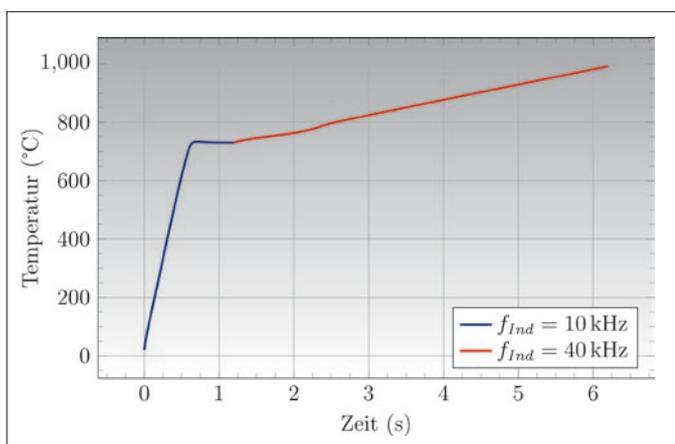


Bild 2: Mehrfrequenzansatz: Härteprozess der Welle unter Verwendung von 10 und 40 kHz

Fig. 2: Multi frequency approach: Hardening process by application of 10 and 40 kHz

net. Rund 86 % der induzierten Leistung konzentriert sich auf die oberflächennahen Bereiche, in denen auch die Härtezonen angeordnet sind. Hohe Frequenzen des Induktorstroms führen zu kleinen Eindringtiefen des elektromagnetischen Feldes und folglich zu kleinen Einhärtetiefen im Werkstück, unter der Randbedingung, dass die Heizdauer so gewählt ist, dass Wärmeleitungseffekte den Prozess nicht dominieren. Durch ein Herabsetzen der Induktorfrequenz lassen sich konsequenterweise höhere Einhärtetiefen erreichen.

Herausforderungen typischer Härteanwendungen

Im Folgenden soll anhand zweier typischer Werkstücke in Form einer Fallstudie auf die Problematiken eingegangen werden, die während eines Härteprozesses auftreten können und die Diskussion mit konkreten Lösungsansätzen auf Basis des IFP-Ansatzes schließen.

Durchhärten von Wellen – Die Problematik der Fehlanpassung und variierender Einhärtetiefen

Die Stromeindringtiefe ist einer der Faktoren, die die Induktoreffizienz und die Verluste in den Kupferwindungen ganz maßgeblich beeinflussen. Im Allgemeinen gilt ein Erwärmungsprozess als effizient, wenn es im erwärmten Werkstück zu keiner Auslöschung der induzierten Ströme kommt, es also ein elektromagnetisch dicker Körper als Werkstück vorliegt. Das ist der Fall, wenn der Durchmesser oder die Dicke des Werkstücks in etwa sechs mal größer ist als die Stromeindringtiefe.

Gegenüber nicht-magnetischen Materialien sind bei der Induktionserwärmung von magnetischen Stählen einige Aspekte zu beachten. Im kalten Zustand von Werkstücken dieser Materialien ist die Stromeindringtiefe δ klein und der Wirkungsgrad des Induktors mit über 80 % relativ hoch. Die Stromeindringtiefe in

Karbon-Stählen steigt mit der Temperatur durch den größer werdenden elektrischen Widerstand langsam an. Wird die Temperatur von 550 °C überschritten, beginnt die magnetische Permeabilität merklich zu fallen, was zu einer deutlichen Vergrößerung der Stromeindringtiefe führt. Bei Erreichen der AC_2 -Temperatur (Curie Punkt) fällt die relative magnetische Permeabilität auf den Wert 1, was einen drastischen Anstieg der Stromeindringtiefe (bis Faktor 15) zur Folge hat. Steigt die Eindringtiefe um den Faktor 15 wird das Werkstück für das äußere elektromagnetische Feld zusehends unsichtbar und es wird deutlich weniger Heizleistung im Werkstück induziert. Der Abfall des Spulenwirkungsgrades hat zur Folge, dass die Stromverluste im Induktor und somit der Kühlbedarf ansteigen. Bei falscher Anpassung der Kühlung setzt das die Standzeiten des Induktors herab.

Somit ist bei der Wahl der Induktorfrequenz besonders darauf zu achten, dass das Verhältnis zwischen Werkstückdicke und Stromeindringtiefe D/δ einen Wert von 6 nicht unterschreitet, soll ein Wirkungsgrad von 80 % bei Verwendung von Ringinduktoren nicht unterschritten werden [1]. Dieser Wirkungsgrad fällt rapide ab, wenn das D/δ kleiner wird. In der einschlägigen Literatur wird als unterster Wert für das Induktionshärten ein D/δ von minimal 3.5 angegeben. Werden Wellen mit variablem Durchmesser gehärtet, ändert sich das D/δ durch die Änderung in der Geometrie des Werkstücks und eine Anpassung der Frequenz ist nötig, wenn der Wirkungsgrad nicht übermäßig abfallen soll.

Als Beispiel sei eine Härtemaschine betrachtet, die Wellen aus Kohlenstoff-Stahl mit variierendem Durchmesser im Bereich von 5 bis 15 mm bei einer Austenitisierungstemperatur von 920 °C durchhärtet. Im ersten Schritt wird lediglich mit einer Frequenz von 10 kHz gearbeitet. In einer zweiten Betrachtung erfolgt eine Adaption der Frequenz von 10 kHz auf 40 kHz.

In **Bild 1** ist zu erkennen, dass die Frequenz von 10 kHz für das Durchhärten zu niedrig gewählt ist. Eine Leistungserhöhung bleibt wirkungslos, lediglich die Aufheizgeschwindigkeit wird verändert. Die Ursache hierfür ist schnell gefunden: Bei Erreichen der Curie-Temperatur verliert der Werkstoff seine magnetischen Eigenschaften und die Stromeindringtiefe vervielfacht sich. Erst ein Umschalten

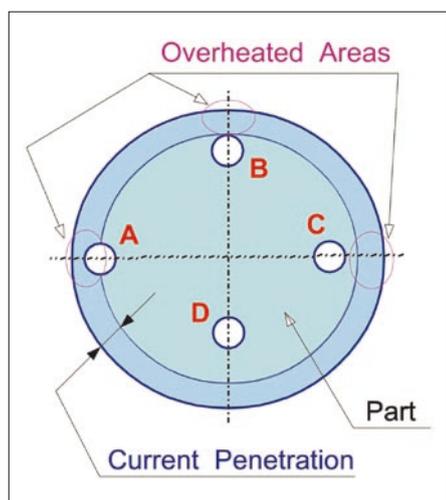


Bild 3: Stromdichteverteilung im Bereich longitudinaler Bohrungen im Werkstück

Fig. 3: Current density distribution in the range of longitudinal holes in a workpiece

der Frequenz auf 40 kHz nach Erreichen des Curiepunktes und somit einer Reduktion der angestiegenen Eindringtiefe sorgt dafür, dass die finale Härtetemperatur erreicht wird. Dieser Zweifrequenz-Ansatz ist in **Bild 2** verdeutlicht. Diese Fallstudie zeigt deutlich die Anpassungsproblematik des Induktors an die jeweiligen Werkstücke, besonders wenn mit einer Frequenz ein ganzes Spektrum verschiedener Werkstückdimensionen abgedeckt werden soll.

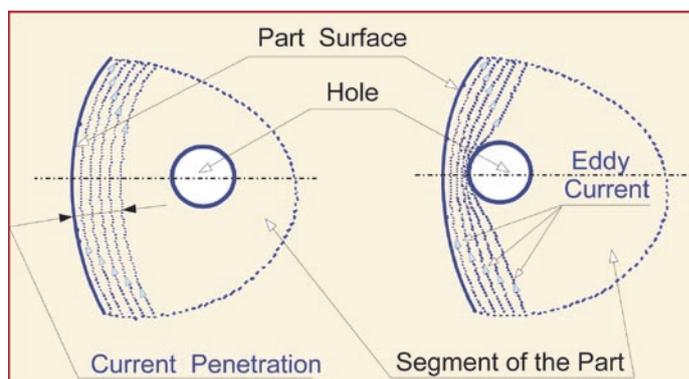
Das Ergebnis der Überlegungen und der Entwicklung ist die Tatsache, dass mit dem IFP Verfahren eine optimale Anpassung der Energiedichte an die gewünschte Erwärmungstemperatur möglich und auch sinnvoll ist. Das reduziert die Heizzeit mit der Folge der Effizienzsteigerung des Induktors und somit der Wirkungsgradoptimierung des Gesamtprozesses.

Aus Platzgründen wird auf eine Diskussion der Problematik an den Übergangszonen zwischen zwei Durchmesserbereichen an der Welle verzichtet.

Unter bestimmten Voraussetzungen ist es auch erforderlich, unterschiedliche Einhärtetiefen an einer Welle zu applizieren. In klassischen Systemen wird die Einhärtetiefe über die Parameter Vorschubgeschwindigkeit und Heizleistung adaptiert. Dieses Vorgehen führt nicht in jedem Fall auch zu guten metallurgischen Ergebnissen. Eine Variation der Frequenz wäre hier der bessere Weg.

Bild 4: Einfluss des Bohrungsabstandes zur Werkstückoberfläche

Fig. 4: Influence of the hole distance to the work piece surface



Der IFP-Umrichter erlaubt im Gegensatz zu Einfrequenz-Systemen neben der stufenlosen Einstellung (von Vorschub) und Leistung auch die stufenlose Adaption der Frequenz während des Prozesses unter Last. Eine Reduzierung der Frequenz führt ganz automatisch zu einer größeren Eindring- und somit auch zu einer größeren Einhärtetiefe. Das löst zum einen die Problematik der Fehlanpassung und sorgt zum anderen dafür, dass in einem Prozessdurchlauf unterschiedliche Einhärtetiefen bei gleichzeitig hoher metallurgischer Qualität erreicht werden können.

Oberflächenhärten von Bereichen mit eingelassenen Bohrungen

Ungünstig gewählte Prozessparameter führen bei Werkstücken mit eingelassener Bohrung oft zu Rissen im Bereich von Bohrungen. Die häufigste Ursache für Brüche im Material ist bei Verwendung von Einfrequenz-Verfahren die Ausprägung lokaler Überhitzungen in den betroffenen Bereichen. Das Überhitzen führt in den meisten Fällen zu unerwünschten Änderungen der Mikrostruktur des Werkstücks, zu übermäßigem Kornwachstum, Formänderungen, Randentkohlung wie auch zur Verflüssigung von Korngrenzen. Die Folge ist die erhöhte Brüchigkeit des Materials. Die Größe, Lage und Ausrichtung von Bohrungen kann große Auswirkungen auf den Fluss der Wirbelströme haben. Im Wesentlichen werden longitudinale (axiale) und transversale Bohrungen unterschieden.

Longitudinale Bohrungen im Werkstück sorgen für eine Umverteilung der induzierten Wirbelströme. Liegt die Bohrung außerhalb der elektromagnetischen Eindringtiefe hat das nur wenig bis gar kei-

nen Einfluss auf das Erwärmungsverhalten. Ist die Bohrung jedoch genau innerhalb des Bereiches angeordnet, in dem 86 % der induzierten Leistung umgesetzt werden, führt das zu einer Überhitzung dieser Bereiche. Die **Bilder 3, 4 und 5** illustrieren diesen Effekt. Der Stromfluss wird in dem Bereich zwischen Oberfläche und Bohrung regelrecht zusammengedrückt, was direkt zu einer drastisch erhöhten Stromdichte in diesem Bereich und folgerichtig dann zu einer Überhitzung mit der Konsequenz der Beschädigung der Mikrostruktur führt.

Ein wesentlicher Nachteil herkömmlicher Induktionserwärmungssysteme ist die fehlende Fähigkeit, die Stromdringungtiefe während des Härteprozesses verändern zu können, um die lokalen Überhitzungspunkte zu minimieren. Es wäre an dieser Stelle sehr vorteilhaft, die Induktorfrequenz im Bereich longitudinaler Bohrungen so zu erhöhen, dass die Stromdichtekonzentration dort weitestgehend stabil bleibt und die Gefahr von Rissbildung in den Bereichen mindert.

Quer zur Achse ausgerichtete transversale Bohrungen erzeugen in jedem Fall

Bild 5: Rissproblematik im Bereich von Bohrung bei fehlangepassten Prozessen

Fig. 5: Formation of cracks in the range of holes in mismatched processes



eine Umverteilung der Wirbelströme im Werkstück. Ähnlich wie im Fall der longitudinalen Bohrungen können lokale Überhitzungen an den Kanten der Bohrung parallel zum Fluss der Wirbelströme auftreten. Ist der Bohrungsdurchmesser kleiner als die Hälfte der Stromeindringtiefe, führt das nicht zwingenderweise zu einer erhöhten thermischen Beanspruchung. Ein Vergrößern des Bohrungsdurchmessers hat an dieser Stelle sehr viel größere Auswirkungen auf eine Überhitzung des Materials. Die Wahl einer kleineren Frequenz und einer kleineren Leistungsdichte helfen hier, das Risiko einer Überhitzung und potentiellen Schädigung des Materials zu mindern.

Die unikale Fähigkeit des IFP-Umrichters, die Frequenz während des Vorschub-Prozesses zu ändern macht es möglich, über eine Frequenzverringern die Konzentration von Wirbelströmen im Bereich der Bohrung zu kompensieren und so für ein deutlich homogeneres Härtebild zu sorgen. [2]

Fazit

Die bisherige Diskussion hat zeigen können, dass eine optimale, prozessseitige Anpassung eines Induktors an ein Werkstück gegenüber klassischen Systemen mit statischen Frequenzen große Vorteile im Bereich der Energieeffizienz wie auch der metallurgischen Qualität bietet. Die durch die Optimierung möglich gewordene schnellere Erwärmungsphase führt als Nebeneffekt auch zu einer Reduktion der Induktorverluste. Die stufenlose Variation der Einhärtetiefe über den Faktor Frequenz macht es möglich, auch kritische Werkstückbereiche, wie Bohrungen und Absätze, sicher und präzise einer Wärmebehandlung zu unterziehen. Weiterhin werden mit der neuen IFP-Technologie die Nachteile von Schwingkreisumrichtern durch die deutlich vereinfachte Anpassung gemindert und neue Freiheiten in der Induktionserwärmung eröffnet.

Literatur

- [1] Benkowski, G.: Induktionserwärmung, 5. bearb. Auflage, Berlin: Verlag Technik, 1990
- [2] Rudnev, V.: Handbook of Induction Heating, New York: Marcel Dekker, 2003

Dipl.-Ing. Alexander Ulferts
HWG Inductoheat GmbH,
Reichenbach

Tel.: 07153 504-226
E-Mail:
ulferts@hwg-inductoheat.de



Dipl.-Ing. Frank Andrä
HWG Inductoheat GmbH,
Reichenbach

Tel.: 07153 504-210
E-Mail:
andrae@hwg-inductoheat.de

