

elektro wärme international

Zeitschrift für elektrothermische Prozesse

Energetische Optimierung von Induktionshärtungsprozessen durch Online-Frequenzanpassung

Dipl.-Ing. Alexander Ulferts, Dipl.-Ing. Frank Andrä

Sonderdruck aus „elektrowärme international“, 69. Jahrgang · 2/2011, Seiten 153-155

VULKAN-VERLAG · HUYSSENALLEE 52-56 · 45128 ESSEN

Energetische Optimierung von Induktionshärtungsprozessen durch Online-Frequenzanpassung

Online frequency adjustment for energy optimisation of induction hardening processes

Alexander Ulferts, Frank Andrä

Vielfach tritt beim Härten von Bauteilen der Anspruch auf, gleich mehrere Stellen am Werkstück zu härten. Die Härtespezifikation gestaltet sich dabei durchaus variabel und die Randbedingungen sind oft vielfältig. Zur Erhöhung der Festigkeit und zum Abfangen der Dauerschwingbelastung werden die betreffenden Bereiche am Werkstück oft tiefer eingehärtet, gleichzeitig bei Bewahrung der duktilen Eigenschaften im Kern, um die Bruchgefahr des wärmebehandelten Bauteils im Betrieb zu reduzieren. In anderen Fällen dient der Härteprozess eher zum Schutz vor höheren Oberflächenbelastungen und Materialabrieb. Beide Anwendungsfälle sollen anhand eines Werkstücks im Rahmen dieses Artikels beleuchtet und die Anforderungen an den induktiven Härteprozess erörtert werden. Dabei wird bewußt die Frage nach den Grenzen der technischen Machbarkeit gestellt.

It is frequently necessary to harden multiple points on a component. The hardness specification may, in many cases, be variable, and the boundary conditions often diverse. The relevant sectors of the component are in many cases more deeply hardened, to enhance strength and vibration-fatigue properties, with simultaneous retention of ductile properties in the core, in order to reduce the danger of fracture of the heat-treated component in service. In other cases, the hardening process is intended more to provide protection against elevated surface loadings and against abrasive erosion of material. Both of these applications are illustrated on the basis of a component in the context of this article, and the requirements made on the inductive hardening process discussed. The authors consciously raise the question of the limits of technical feasibility.

Einleitung

Folgender Fall sei betrachtet: Eine Welle aus dem Material C45 (SAE 1045) mit einem Durchmesser von 20 mm soll an zwei unterschiedlichen Stellen induktiv gehärtet werden. Bereich 1 ist aus Stabilisierungsgründen 4 mm tief einzuhärten, um die auf die Welle wirkende, schwingende Dauerbelastung abzufangen. Bereich 2 ist ein Lagersitz und daher aus Gründen der Reduzierung der geometrischen Verzüge nur mit 0,5 mm einzuhärten (**Bild 1**).

Um die passende Frequenz und die notwendige Leistungsverteilung für das Er-

reichen der Härteziele zu evaluieren, werden jeweils für die Oberfläche und für den unteren Bereich der Härtezone zwei Ziel-Temperaturen festgelegt. Die Tiefe der Härtezone sei durch den Temperaturgradienten abgeschätzt, um den Prozess mit Hilfe numerischer Modellierung zu analysieren:

An der Oberfläche soll die finale Härte-temperatur 990 °C betragen (temp_o im Diagramm). Gleichzeitig soll die Temperatur am unteren Bereich der Härtezone 850 °C (temp_i im Diagramm) betragen. Die tiefer liegenden Schichten des Materials unterliegen dann dem Abfall der Härte hinab bis auf die Grundhärte des Materials.

Beide Härtestellen werden im Folgenden bei einem Härteprozess mit 5 kHz und 50 kHz als Arbeitsfrequenz betrachtet. Die Temperaturverläufe im Ablauf der Erwärmungszeit für die Oberfläche (temp_o) und der untere Härtebereich (temp_i) werden analysiert und die für die Prozesse notwendige Gesamtenergie berechnet.

Ein wichtiger Faktor zum effizienten Erreichen der Härtetiefe stellt die elektromagnetische Eindringtiefe dar, die sich neben der Frequenz aus den elektrischen, jedoch temperaturabhängigen Materialparametern ableitet [1] und [2].

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}} \quad (1)$$

Bei den gewählten Frequenzen von 5 kHz und 50 kHz ergibt sich ein Verhältnis von $\sqrt{10}$ zwischen den sich ergebenden Eindringtiefen:

$$\frac{\delta_{5\text{kHz}}}{\delta_{50\text{kHz}}} = \sqrt{10} = 3,1623 \quad (2)$$

Innerhalb der elektromagnetischen Eindringtiefe wird rund 86 % der im Werkstück induzierten Leistung in Wärme umgesetzt. Diese Größe ist somit maßgeblich zum Einstellen der korrekten Einhärtetiefe.

Härtebereich 1: Stabilisierungszone

Im Bereich der Stabilisierungszone ist es das Ziel, 4 mm tief einzuhärten. In **Bild 2** ist die Aufheizkurve für die beiden zuvor festgelegten Messpunkte bei einer Arbeitsfrequenz von 50 kHz zu erkennen. Die Aufheizgeschwindigkeit am unteren Ende der Zielhärtezone fällt deutlich ge-

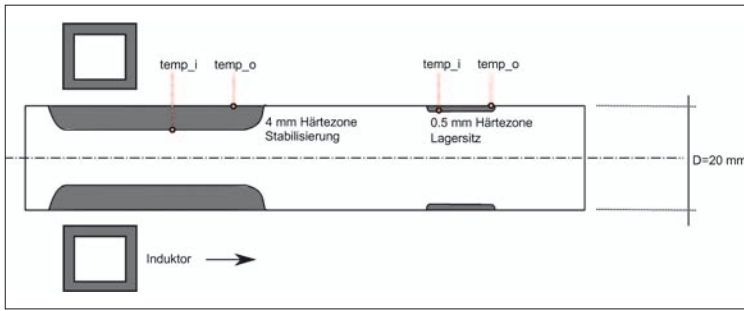


Bild 1: Musterwerkstück: Welle, D= 20 mm

Fig. 1: Specimen component: shaft, d = 20 mm

Für die induktive Wärmebehandlung der Stabilisierungszone eignet sich die geringere Frequenz von 5 kHz besser; zudem liegt die Energieeffizienz bei einem Prozess mit 5 kHz deutlich höher.

Härtebereich 2: Lagersitz

Im Bereich des Lagersitzes ist es das Ziel, 0,5 mm tief einzuhärten, um die Werkstückverzüge in dem Bereich so minimal wie möglich zu halten. Das wird erreicht, in dem der Wärmeeinfluss und auch die Martensitausbildung so gering wie möglich ausgestaltet werden. Auch für diesen Anwendungsfall sollen die Prozesse bei 50 kHz und bei 5 kHz betrachtet werden. Tendenziell ergibt sich hier eine völlig andere Verteilung der Ergebnisse.

Bild 4 zeigt die Aufheizkurven des Materials im Bereich des Lagersitzes an der Oberfläche und am unteren Bereich der gewünschten Härtezone für die Arbeitsfrequenz von 50 kHz. Klar erkennbar ist

ringer aus als an der Oberfläche. Ab dem Curiepunkt nimmt die Aufheizgeschwindigkeit merklich ab, was dazu führt, dass sich beide Temperaturen angleichen und sich am Ende des Heizprozesses die gewünschte Differenz von 140 °C einstellt (990 °C zu 850 °C). Insgesamt dauert der gesamte Heizprozess bei einer Frequenz von 50 kHz rund 2,4 s.

Wird die Arbeitsfrequenz um den Faktor 10 von 50 kHz auf 5 kHz reduziert, ist der Unterschied zwischen den Auf-

heizgeschwindigkeiten noch gegeben, jedoch weniger ausgeprägt (**Bild 3**). Am Ende des Aufheizprozesses bleibt wiederum die Differenz von 140 °C. Jedoch erhöht sich die Gesamtheizzeit bei 5 kHz von 2,4 s auf 7 s.

Aus der zeitlichen Leistungsverteilung lässt sich auf den sich ergebenden Energiebedarf schließen, der beim Härteprozess mit 5 kHz gegenüber dem Prozess mit 50 kHz zu einer Energieeinsparung von 27 % führt.

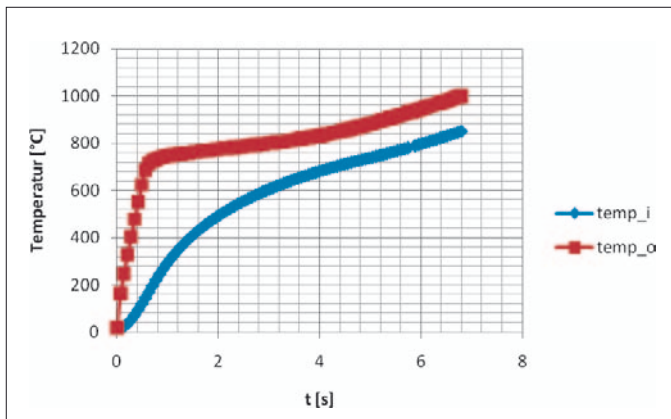


Bild 2: Härten der Stabilisierungszone bei einer Frequenz von 5 kHz
Fig. 2: Hardening of the stabilisation zone at a frequency of 5 kHz

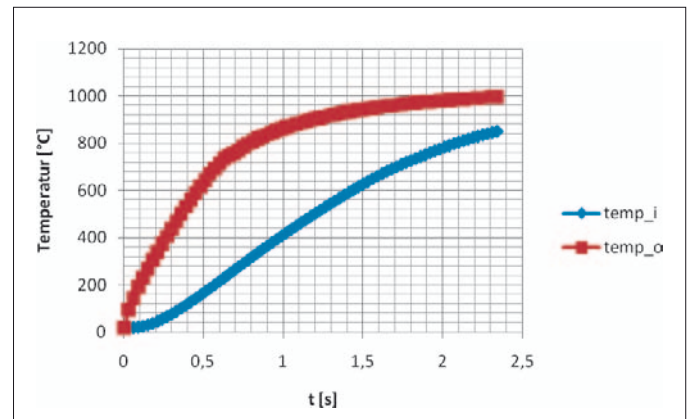


Bild 3: Härten der Stabilisierungszone bei einer Frequenz von 50 kHz
Fig. 3: Hardening of the stabilisation zone at a frequency of 50 kHz

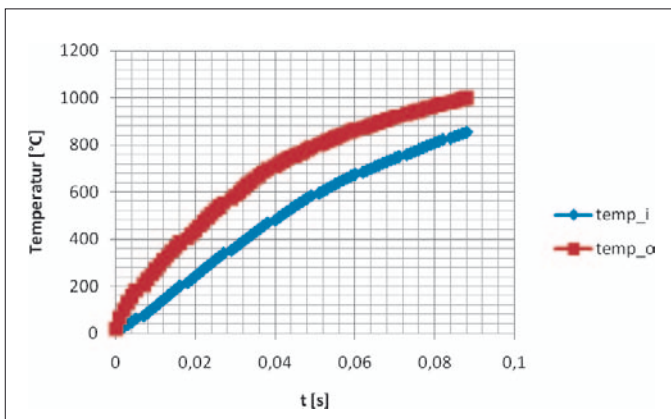


Bild 4: Härten des Lagersitzes bei einer Frequenz von 5 kHz
Fig. 4: Hardening of the bearing seat at a frequency of 5 kHz

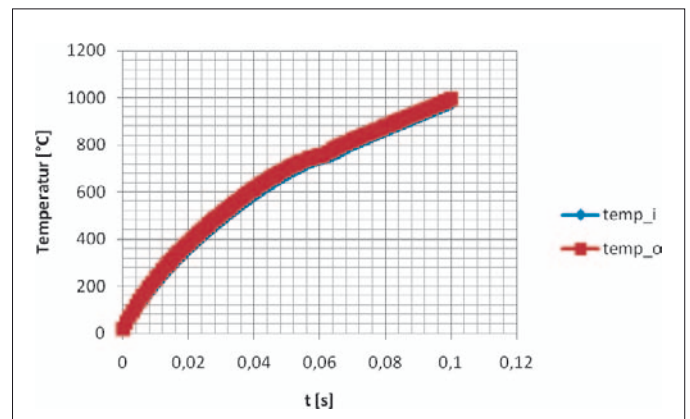


Bild 5: Temperaturdifferenz beim Härten des Lagersitzes, Frequenz: 5 kHz
Fig. 5: Temperature difference in hardening of the bearing seat, frequency: 5 kHz

die stärkere Aufheizgeschwindigkeit an der Oberfläche und die deutliche Temperaturdifferenz zwischen den Messpunkten, die sich am Ende des Erwärmungsprozesses auf das zuvor festgelegte Level von 140 °C einstellt. Die Heizzeit im Prozess beträgt 100 ms. Somit wird der gewünschte Härteverlauf in diesem Prozess problemlos erreicht.

Die Reduktion der Arbeitsfrequenz von 50 kHz auf 5 kHz zeigt eine deutliche Änderung in der Qualität der Erwärmung. Ein Unterschied zwischen den Aufheizgeschwindigkeiten an der Oberfläche und der tiefer liegenden unteren Schicht der Härtezone (**Bild 5**) ist nicht mehr erkennbar. Ein Blick in die Detailauflösung (**Bild 6**) zeigt, dass sich am Ende des Heizprozesses eine Differenz von unter 25 °C zwischen den Messpunkten einstellt. Das führt zu einer deutlich tieferen Einhärtung als zuvor definiert. Selbst mit einer kurzen Heizzeit von 100 ms ist das Härtebild am Lagersitz mit einer Frequenz von 5 kHz nicht erreichbar.

Ein Blick auf den Energiebedarf der beiden betrachteten Prozesse zeigt, dass der Prozess bei 50 kHz einen um 77 % niedrigeren Energiebedarf besitzt als der Prozess bei 5 kHz.

Für die induktive Wärmebehandlung des Lagersitzes ist eine Arbeitsfrequenz von 50 kHz zu wählen. Das geforderte Härtebild ist mit einer Frequenz von 5 kHz nicht erreichbar und steht auch energetisch in keinem Verhältnis zum höherfrequenten Prozess.

Fazit

Das vorliegende Werkstück zeigt zwei Härtestellen auf, die im induktiven Härteprozess mit zwei unterschiedlichen Frequenzen behandelt werden müssen, die sich im Optimalfall um den Faktor 10 unterscheiden. Somit ist während des Wärmebehandlungsprozesses eine Änderung der Frequenz notwendig. Im klassischen Fall sind dazu zwei verschiedene Schwingkreis-Umrichter (5 kHz und 50 kHz) nötig. Der Härteprozess wird so in zwei Teilprozesse zerlegt.

Ein neuer Ansatz ist die Verwendung des zwangsgeführten Umrichters Statitron iFP [3]. Die Umrichterfrequenz wird bei diesen Umrichtern nicht mehr durch die im System enthaltenen induktiven und kapazitiven Elemente bestimmt, sondern wird vorgegeben durch die Steuerung der Pulsweitenmodulation. Über

Bild 6: Härten des Lagersitzes bei einer Frequenz von 50 kHz

Fig. 6: Hardening of the bearing seat at a frequency of 50 kHz

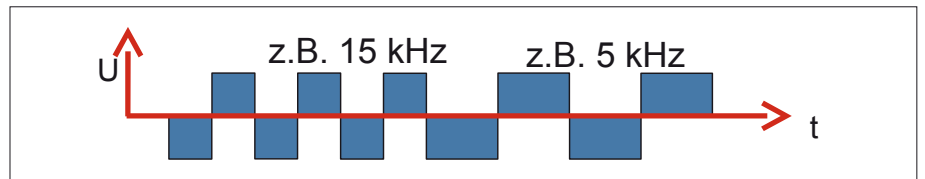
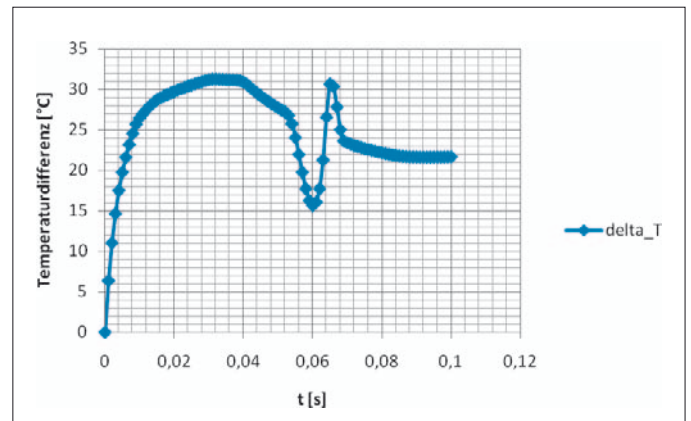


Bild 7: Modulation der Frequenz über die Länge der Impulse

Fig. 7: Modulation of frequency across pulse length

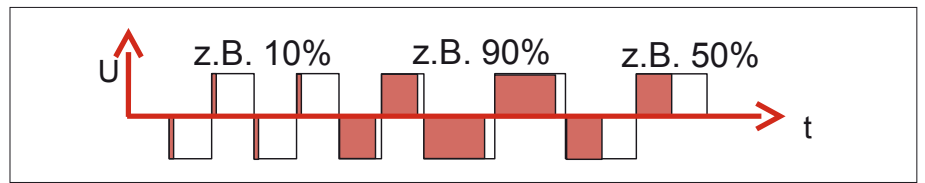


Bild 8: Modulation der Leistung über die Impulsweite

Fig. 8: Modulation of power across pulse width

eine Änderung der Impulslänge ist die Arbeitsfrequenz auch während eines Heizprozesses frei variierbar (**Bild 7** und **Bild 8**). Gleichzeitig ist eine zeitgesteuerte Anpassung der Leistung über eine Änderung des Duty-Cycles möglich.

Die beiden Härtestellen der Welle sind somit in einem Prozess und einer Aufspannung durch die Online-Änderung der Frequenz induktiv härtbar. Zudem führt die Online-Frequenzoptimierung des Härteprozesses zu deutlich energieeffizienterem Verhalten des Härteprozesses. Bei identischer Qualität der Temperaturverteilung sind für den betrachteten Fall Einsparungen von 27 % im Energieverbrauch möglich.

Literatur

- [1] Benkowsky, G.: Induktionserwärmung
- [2] Rudnev, V.; Loveless, D.; Cook, R.; Black, M.: Handbook of Induction Heating. CRC Press, 2002

- [3] Ulferts, A.; Andrä, F.: Innovation durch adaptive Frequenzvariation im Induktionshärten. elektrowärme international (2010) Nr. 3, S. 217–220

Dipl.-Ing. Alexander Ulferts
HWG Inductoheat GmbH
Reichenbach

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



Dipl.-Ing. Frank Andrä
HWG Inductoheat GmbH
Reichenbach

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





Besuchen Sie uns
am Stand B24
in Halle 10
28.06. – 02.07.2011

Induktion

eine Dimension weiter.



Induktive Härte- und Erwärmungsanlagen

- Frequenzumrichter **powered**
- Verfahrensentwicklung
- Induktionslohnhärtereien
- Service weltweit
- Induktor-Express-Service
- Seminare/Schulungen



HWG INDUCTOHEAT GmbH
Ostweg 5
73262 Reichenbach/Fils
Telefon 49 (0) 71 53 504-0
www.hwg-inductoheat.de



Leading Manufacturers of Melting, Thermal Processing &
Production Systems for the Metals & Materials Industry Worldwide

60
JAHRE

**HWG
INDUCTOHEAT**
Heiße Innovationen für stahlharte Lösungen