

Einfluss der Frequenz und Erwärmungszeit auf die Härtetiefe von großen Werkstücken

von Stefan Schubotz

Beim induktiven Randschichthärten haben die Frequenz und die Dauer des Erwärmungsvorganges einen signifikanten Einfluss auf die Härtetiefe im Werkstück. Grundsätzlich gilt, dass die Einhärtetiefe mit steigender Erwärmungszeit zu-, bzw. mit zunehmender Frequenz abnimmt. Bei großen Werkstücken und langen Erwärmungszeiten wird aufgrund des dominierenden Einflusses der Wärmeleitung daher vielfach von einer unwesentlichen Bedeutung der Frequenz ausgegangen. Diese These sowie der Einfluss der Frequenz und Erwärmungszeit auf die Härtetiefe werden daher in diesem Bericht untersucht.

Viele Bauteile aus Kohlenstoffstählen, die im Einsatz einer hohen mechanischen Belastung ausgesetzt werden, müssen vorab wärmebehandelt bzw. gehärtet werden. Oftmals soll nur die Randschicht des Werkstücks erwärmt werden, um in Kombination mit dem duktilen Kern eine Erhöhung der Verschleiß-, Schwing- und Dauerfestigkeit zu erreichen [1]). Für den Aufheizvorgang eignet sich das Verfahren der induktiven Erwärmung, da hier hohe Leistungsdichten im kW/cm^2 -Bereich (z. T. auch im Bereich mehrerer 10 kW/cm^2 [2]) generierbar sind und gezielt auf die Oberfläche bzw. in die oberflächennahen Schichten des Werkstücks eingebracht werden können.

Der zu härtende Werkstückbereich ist zunächst induktiv auf eine hohe Temperatur (meist um die 900 bis 1.000°C) zu erwärmen, wodurch die Atomgitterstruktur vom kubisch-raumzentrierten in den kubisch-flächenzentrierten Zustand übergeht. Hierdurch werden größere Freiräume in den Gitterstrukturen geschaffen, infolgedessen können sich die gelösten Kohlenstoffatome dort einlagern. Anschließend ist eine zügige Abkühlung des Werkstücks (Abschreckvorgang) durchzuführen, damit die Kohlenstoffatome auch nach Umwandlung der Gitterstruktur an ihren Plätzen bleiben. Dieses resultierende verzerrte Gitter weist eine deutlich höhere Festigkeit als das Grundgefüge auf.

Einen wesentlichen Einfluss auf die Einhärtetiefe haben die Frequenz des Induktorstromes und die Dauer, wie lange das Werkstück dem vorwiegend magnetischen Feld exponiert ist. Je nach Abmessung der Werkstücke und der Zielsetzung der Wärmebehandlung sind unterschiedliche Härtetiefen gefordert. Zum einen kann hier grundsätzlich gesagt werden, dass Bauteile mit großen Abmessungen meist eine höhere Einhärtetiefe erfordern. Zum zweiten sind die Erwärmungszeiten für große Werkstücke in der Regel deutlich länger als bei kleinen Werkstücken. Als Beispiele für große Werkstücke sind Großlagerringe (u. a. in Windkraftanlagen), Bodenplatten in Kettenfahrzeugen oder große Wellen und Lager in Lastkraftwagen zu nennen. Aufgrund der großen Bauteilgeometrie und gleichzeitig bedingt durch die Einbringung der Wärmequellen in die oberflächennahen Schichten hat sich auch nach langer

Erwärmungszeit der Werkstückkern noch nicht nennenswert erwärmt. Eine Erwärmung in kürzerer Zeit ist meist nicht möglich, da sonst die notwendige zur Verfügung gestellte Leistung des Umrichters zu groß wäre und weil die Frequenz bei den sich stark temperaturabhängigen Materialeigenschaften von magnetischem Stahl für einen großen Temperaturbereich zu hoch wäre. Als Lösung wird daher die Erwärmungszeit erhöht und die gewünschte hohe Härtetiefe über Wärmeleitungsvorgänge erreicht. Das hat wiederum den Nachteil, dass der Prozess hierdurch viel Zeit in Anspruch nimmt. Um die lange Erwärmungszeit etwas zu reduzieren, könnte die Erwärmung über eine niedrigere Frequenz erprobt werden, wobei hier der Einfluss (bei auch weiterhin vergleichsweise langer Erwärmungsdauer) zu hinterfragen ist.

Der Einfluss beider Prozessgrößen (Frequenz und Erwärmungszeit) auf die Härtung großer Werkstücke wird daher im Folgenden diskutiert und insbesondere für längere Prozesszeiten untersucht.

Frequenz

Grundsätzlich ist für die induktive Erwärmung von Materialien ein Wechselstrom zu verwenden. Mit einem Gleichstrom wird gemäß des Durchflutungsgesetzes auch ein Magnetfeld erzeugt, jedoch ist damit keine berührungslose Spannungsübertragung (Induktionsgesetz) möglich.

Bei der induktiven Erwärmung eines Werkstücks ist die höchste Stromdichte immer an der Werkstückoberfläche und nimmt in Richtung des Kerns exponentiell ab (siehe **Bild 1**). Die hier gültige zentrale Größe ist die elektromagnetische Eindringtiefe. Diese gibt die Tiefe an, bei der die Stromdichte auf $1/e = 37\%$ des Amplitudenwertes gefallen ist. Sie ist abhängig von dem spezifischen elektrischen Widerstand ρ_{el} des Materials, der Permeabilität μ sowie von der Frequenz f und wird über den folgenden Zusammenhang berechnet:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho_{el}}{\pi \cdot f \cdot \mu}}$$

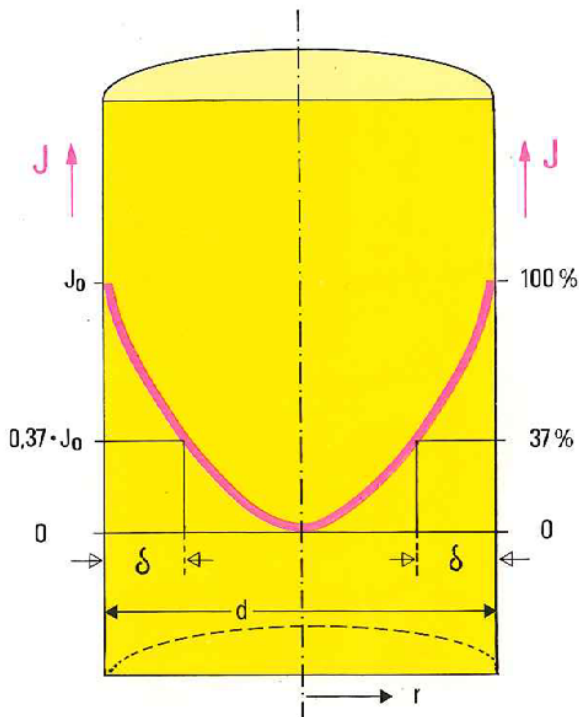


Bild 1: Schnittbild über die Verteilung der Stromdichte J in einem Metallzylinder mit dem Durchmesser d [3]

Die Permeabilität und der spezifische elektrische Widerstand des Werkstoffs sind Eigenschaften, die bei festgelegtem Material als gegeben und unveränderbar zu sehen sind. Es existieren nur wenige Fälle, wo ein Anwender noch flexibel hinsichtlich der Materialwahl ist, sodass man in der Regel nur über die Frequenz Einfluss auf die Stromeindringtiefe nehmen kann. Bei kurzen Prozesszeiten (Härte- und Abschreckvorgang) ist somit die Frequenz die maßgebliche Größe für die Härtetiefe.

Insbesondere bei niedrigen Temperaturen findet die Erwärmung des Werkstücks fast ausschließlich an der Oberfläche statt. So hat man auch mit einer vergleichsweise niedrigen Frequenz von 1 kHz bei der Erwärmung von Stahl bei Raumtemperatur nur eine Stromeindringtiefe von ca. 0,6 mm. Diese erhöht sich mit zunehmender Werkstückerwärmung aufgrund der Erhöhung des spezifischen elektrischen Widerstandes und der Verringerung der Permeabilität auf 1,9 mm bei 400 °C und 17,4 mm bei 1.000 °C [3]. Hierdurch wird auch klar, dass bei hoher gewünschter Härtetiefe die Frequenz für einen signifikanten Temperaturbereich praktisch immer zu hoch ist und man die Zielvorgaben nur über Wärmeleitung erreichen kann.

Für die Erzeugung der Frequenz bzw. des Wechselstromes werden heutzutage für gewöhnlich Umrichter verwendet (siehe **Bild 2**). Diese erzeugen aus der Netzspannung (50/60 Hz) unter Einsatz eines Gleichrichters mit Zwischenkreis zunächst bauartabhängig eine/n Gleichspannung/-strom (idealisiert: 0 Hz). Mithilfe eines Wechselrichters erfolgt anschließend eine weitere Konvertierung dieser Größe in eine/n Wechselspannung/-strom (kHz-Bereich). Der daran angrenzende Außenschwingkreis bestehend aus Kondensatoren, (meist) einem Transformator und dem Induktor gibt hierbei die Frequenz ($\approx$ Resonanzfrequenz) vor [4]. Bei der Umrichter- bzw. Schwingkreisauslegung muss daher die gewünschte Frequenz bekannt sein, damit der Schwingkreis entsprechend festgelegt wird. Insbesondere durch die Kondensatoren oder den Anpasstransformator ist man aber bei einigen Umrichtertypen in einem gewissen Rahmen auch noch nachträglich flexibel in der Frequenzanpassung [5]. Für die Erzeugung einer möglichst niedrigen Frequenz muss der Anpasstransformator ausreichend hochpermeables Material besitzen, um eine Sättigungsmagnetisierung zu vermeiden. Daher ist dieser oft limitierend für die untere Frequenzgrenze. Die obere Frequenzgrenze ist wiederum in der Regel auf den Schaltverlusten der Transistoren im Wechselrichter begründet. Jeder Schaltvorgang verursacht Schaltverluste, welche sich bei einer hohen Frequenz entsprechend aufsummieren. Die Leistungshalbleiter erwärmen sich und ab einer bestimmten Schwelle ist eine ausreichende Kühlung nicht mehr möglich.

Erwärmungszeit

Im Umrichter wird die Erwärmungszeit für gewöhnlich über die Modulationsdauer der Leistungshalbleiter im Gleichrichter, Wechselrichter oder im Zwischenkreissteller eingestellt [6]. Bei den meisten Werkstücken und insbesondere bei großen Bauteilen sind die Erwärmungszeiten so lang, dass die Folgen der Wärmeleitung zu berücksichtigen sind. Mathematisch wird dies über die folgende Gleichung berechnet:

$$c_p \cdot \rho \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} \vartheta) + p_{\text{Wärme}}$$

Hierbei ist c_p die spezifische Wärmekapazität, ρ die Dichte, ϑ die Temperatur, t die Zeit und λ die Wärmeleitfähigkeit des Werkstücks. Die über die Induktion eingebrachten Wärmequellen $p_{\text{Wärme}}$ sind ebenfalls in der Formel enthalten. Diese Gleichung drückt aus, wie sich die Temperatur in dem Werkstück zeit- und ortsabhängig verändert. Unter Annahme eines großen Bauteils, d. h. der Werkstückkern ist auch nach langer Erwärmungszeit kaum erwärmt, finden somit Wärmeleitungsvorgänge auch dann noch statt. Der Gradient als treibende Kraft der Wärmeleitung sinkt aber wiederum mit zunehmender Erwärmungszeit, was in einer zeitlich überproportional langsamer steigenden Härtetiefe mündet.

Bild 3 zeigt das Schnittbild der Temperaturverteilung eines induktiv erwärmten Metallzylinders bei 1 kHz und 10 kHz [3]. Hieraus ist herzuleiten, dass die Wärmequellen vor allem in den oberflächennahen Schichten entstehen und das Werkstück im Kern vor allem durch Wärmeleitung erhitzt wird. Bei den Ergeb-

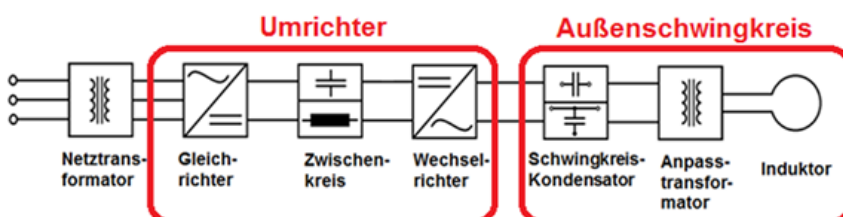


Bild 2: Prinzipschaltbild des Leistungsstrangs einer induktiven Erwärmungsanlage [4]

nissen mit 1 kHz erfolgt hierbei die Erwärmung im Werkstückkern aufgrund der höheren Stromeindringtiefe entsprechend schneller. Mit zunehmender Erwärmungszeit wird die Temperaturverteilung über den Querschnitt konstanter und es fängt an, sich ein Gleichgewicht aus induktiv eingebrachten Wärmequellen und (vor allem) Wärmestrahlung einzustellen.

In dieser Untersuchung werden bereits Härtetemperaturen im Kern erreicht. Würde hier ein noch längerer Zeitraum betrachtet werden, wäre bei Erreichung des Gleichgewichts aus eingebrachter Wärmeenergie und Abstrahlwärme eine nahezu frequenzunabhängige Temperaturverteilung im Werkstück zu erwarten (gleiche gemittelte Leistungsdichte im Werkstück vorausgesetzt). Beim induktiven Randschichthärten ist allerdings eine Änderung der Gefügeeigenschaften im Kern und damit eine Erwärmung dort zu vermeiden. Für die im Folgenden vorgestellte Modellierung ist das Werkstück daher entsprechend größer zu simulieren.

Modell

Für die Untersuchung soll ein Werkstück mit einem hohen Durchmesser modelliert werden, welches auch bei einer langen Heizzeit nahezu keine Temperaturerhöhung im Kern aufweist. Bei einer zu großen Dimensionierung würde jedoch die Auflösung in der schmalen Randschicht zu gering sein bzw. würde andernfalls die Rechenzeit zu hoch werden. Hierbei hat sich ein rotationssymmetrisches Werkstück mit einem Durchmesser von 1 m als geeignet herausgestellt, welches induktiv mit einem Ringinduktor (Innenfeld) erwärmt wird. Der Werkstückkern erwärmt sich dann bei Betrachtung des Falls mit der höchsten generierten Härtetiefe (niedrigste Frequenz und längste Erwärmungszeit) zum Ende des Aufheizvorganges hin nur um ca. 0,3 K.

Für die Modellierung wird das 1D-Simulationstool Elta [7] eingesetzt. Als Werkstoff wird magnetisierbarer Stahl (C40) mit den in der Materialdatenbank hinterlegten Parametern angenommen. Hierbei wird neben den temperaturabhängigen Eigenschaften der Werkstückparameter auch die Feldstärkeabhängigkeit der Permeabilität berücksichtigt.

Das Werkstück wird zunächst auf Härtetemperatur erwärmt. Bei der Verifikation mithilfe praktischer Versuche hat sich gezeigt, dass die tatsächliche Härtetiefe gut mit dem Modell übereinstimmt, wenn ein Temperaturbereich von 800 bis 1.100 °C angenommen wird. Dieser vergleichsweise große Bereich rührt daher, dass bei der 1D-Simulation die Erwärmung der Werkstückzonen, die sich nicht unter dem Induktor aber in unmittelbarer Nähe (daran angrenzend) befinden, nicht berücksichtigt werden. Hierdurch hat man in der Praxis einen flacheren Temperaturverlauf und damit eine geringere Temperaturdifferenz als in der Simulation.

Die Einstellung der Zieltemperatur an der Oberfläche (≈ 1.100 °C) erfolgt über eine Anpassung der Leistungsdichte an der Werkstückoberfläche.

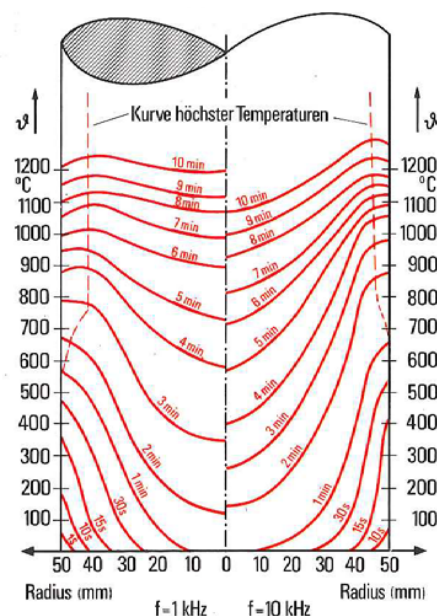


Bild 3: Temperaturverteilung im Schnittbild eines induktiv erwärmten Metallzylinders bei einer Erwärmung mit 1 kHz und 10 kHz zu unterschiedlichen Zeitpunkten [3]

Für den Erwärmungsvorgang wird ein Emissionsgrad von 0,8 bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C zugrunde gelegt.

In der Regel besteht zwischen dem Heiz- und dem Abschreckvorgang eine kurze Verweilzeit (sog. „Schleppzeit“), die auch hier mit einer typischen Dauer von 1 s berücksichtigt wird. Hierbei hat sich in den Simulationen gezeigt, dass diese nur bei langen Heizzeiten (oberhalb 1 min) zu einer bedeutenden Erhöhung der Härtetiefe geführt hat und in den anderen Fällen die Wärme aufgrund des höheren Temperaturgradienten zu umfangreich ins Werkstückinnere abgeleitet wird. Der Abschreckvorgang wird ebenfalls in der Simulation unter Annahme eines konstanten Wärmeübergangskoeffizienten ($5.000 \text{ W}/[\text{m}^2 \text{ K}]$) modelliert. Die Härtetiefe kann anschließend bei 800 °C abgelesen werden.

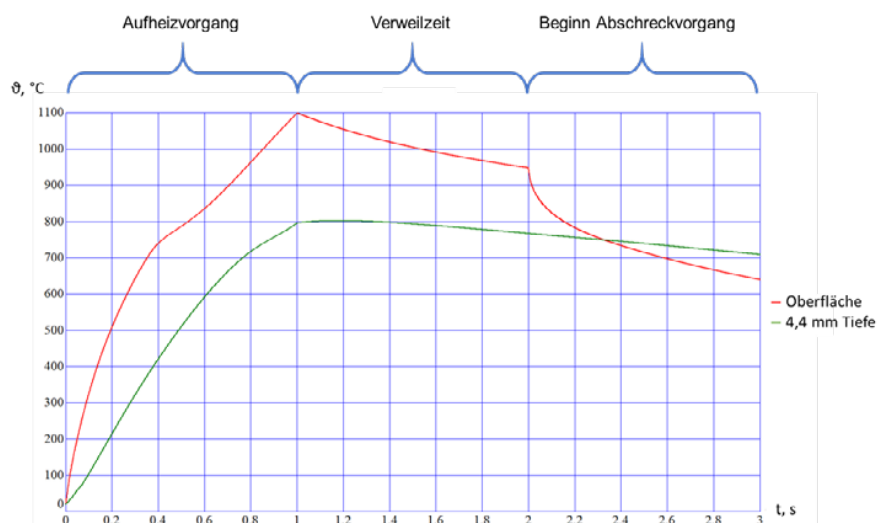


Bild 4: Beispiel-Temperaturkurven an der Oberfläche (max: 1.100 °C) und in 4,4 mm Tiefe (max: 800 °C) im Werkstück. Frequenz: 1 kHz; Erwärmungszeit: 1 s

Bild 4 zeigt exemplarisch die Temperaturverläufe bei einer Erwärmung mit 1 kHz in 1 s. Die Leistungsdichte an der Werkstückoberfläche wird entsprechend so eingestellt, dass dort eine Temperatur von 1.100 °C entsteht. Anschließend wird geprüft, in welcher Tiefe noch 800 °C auftreten ($\approx 4,4$ mm). Hier ist auch zu erkennen, dass die Temperatur in 4,4 mm Tiefe während der Verweilzeit kaum gestiegen ist. Vom Abschreckvorgang ist nur der Beginn, d. h. die erste Sekunde dargestellt. Zu sehen ist hier, dass bereits nach kurzer Zeit (ca. 0,3 s) die Oberflächentemperatur die Temperatur in 4,4 mm Tiefe unterschreitet. Der Gradient ist dort flacher als an der Oberfläche, sollte aber für eine vollständige martensitische Umwandlung möglichst steil sein. Hieraus kann man auch ableiten, dass bei einer hohen Erwärmtiefe der Gradient noch flacher verlaufen würde, sodass bei entsprechend hoher Tiefe aufgrund der geringen Abschreckrate (K/s) eine Härtung nicht mehr erfolgt.

Für die vollständige Untersuchung werden Simulationen mit unterschiedlichen Frequenzen (1–1.000 kHz) und Aufwärmzeiten zwischen 1 s und 10 min durchgeführt und die Ergebnisse im Folgenden vorgestellt.

Ergebnisse

Die Simulationsergebnisse über den Einfluss der Erwärmungszeit für verschiedene Frequenzen auf die Einhärtetiefe sind in **Bild 5** zu sehen. Erwartungsgemäß führt eine niedrige Frequenz bedingt durch die hohe Stromeindringtiefe und eine lange Erwärmungszeit aufgrund der Wärmeleitung zu einer höheren Einhärtetiefe.

Für eine tiefergehende Analyse und einer daraus ableitbaren Aussage sind **Bild 6** und **Tabelle 1** heranzuziehen. Hier

werden für die Charakterisierung der Zahlen zwei Kenngrößen verwendet, welche aus den Simulationsergebnissen einfach berechnet werden können:

1) Härtetiefendifferenz

- Hierbei handelt es sich um die Differenz der Härtetiefen zwischen 1 kHz und 1 MHz (z. B. bei einer Sekunde Heizzeit: 4,4 mm – 1 mm = 3,4 mm). Die Zahl stellt somit eine absolute Zahl (in mm) dar, welche den Vorsprung der Einhärtetiefe von der niedrigen gegenüber der hohen Frequenz wiedergibt.

2) Härtetiefenverhältnis

- Hierunter wird das Verhältnis der Härtetiefen zwischen 1 kHz und 1 MHz (z. B. bei 1 s Heizzeit: 4,4 mm / 1 mm = 4,4) verstanden. Dieser Quotient gibt grundsätzlich den Einfluss der Frequenz an. Ein hohes Verhältnis drückt hierbei eine signifikante Wirkung der Frequenz gegenüber der Wärmeleitung aus und bei einem Verhältnis von 1 würde die Frequenz keine Rolle mehr spielen.

Schaut man sich zunächst einmal in **Bild 6** die Entwicklung der Härtetiefendifferenz (grüne Kurve) an, ist mit zunehmender Erwärmungszeit ein ansteigender Trend zu verzeichnen. Bei kurzen Heizzeiten (1 s) ist die Einhärtetiefe aufgrund der nur gering ausgeprägten Wärmeleitung erwartungsgemäß stark frequenzabhängig. Wie in **Bild 4** gezeigt, beträgt hier die Einhärtetiefe bei einer Erwärmung mit 1 kHz ca. 4,4 mm und bei 1 MHz etwa 1 mm, was somit einer Härtetiefendifferenz von 3,4 mm entspricht. Auch bei längerer Heizzeit (5 s) hat sich der Abstand kaum erhöht (3,5 mm). Infolgedessen könnte hier zunächst ein unbedeutender Einfluss der Frequenz bei langen Heizzeiten

schlussgefolgt werden. Die weiteren Simulationen mit deutlich längeren Heizzeiten zeigen allerdings, dass sich die Abstände zwischen den Härtetiefen immer weiter vergrößern. So wird bei einer Simulationszeit von 10 min eine Härtetiefe von 30,5 mm bei 1 kHz und 20,2 mm bei 1 MHz simuliert. Die Härtetiefendifferenz hat sich somit auf über 10 mm erhöht. Hieraus wird klar, dass auch bei langen Heizzeiten die Frequenz weiterhin eine Rolle spielt und auch dann entsprechend niedrig auszulegen ist.

Die rote Kurve in **Bild 5** zeigt das Härtetiefenverhältnis und damit im Wesentlichen die Bedeutung der Frequenz in Abhängigkeit der Erwärmungszeit. Hier ist zu erkennen, wie sich der Einfluss der Frequenz mit zunehmender Heizzeit immer weiter reduziert. Bei 1 s Erwärmungszeit beträgt das Verhältnis noch etwa 4,4. Dieser Wert verringert sich bei einer 5 s andauernden Erwärmung aber deutlich auf nur noch ca. 2,8. Wird die Erwärmungszeit noch weiter erhöht auf 10 min, verringert sich das Härtetiefenverhältnis sogar auf ca. 1,5. Für den hypothetischen Fall eines Werk-

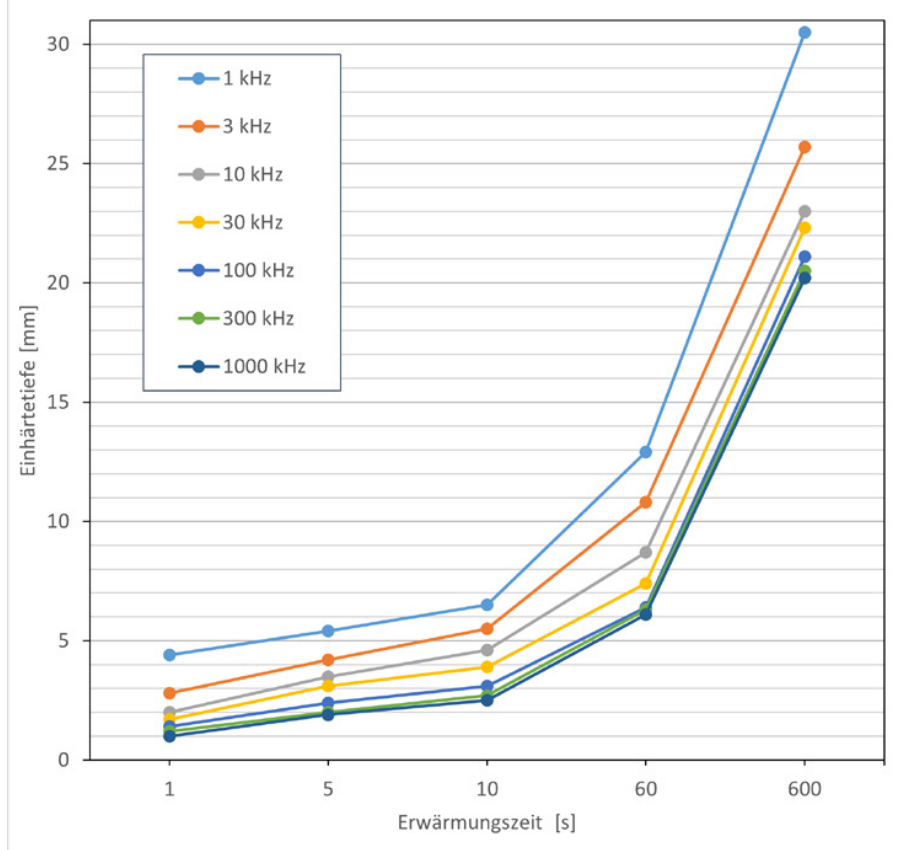


Bild 5: Einfluss der Erwärmzeit (1 s–10 min) und der Frequenz (1–1.000 kHz) auf die Einhärtetiefe eines großen Bauteils ($\varnothing 1.000$ mm)

stücks mit unendlichem Durchmesser ist nach sehr langer Heizzeit ein Verhältnis von ≈ 1 zu erwarten, was damit den Einfluss der Frequenz negieren würde. Bei dieser Simulation wurden bei Heizzeiten von 10 min allerdings bereits Härtetiefen von bis etwa 30 mm erreicht. In der Praxis sind höhere Härtetiefen kaum möglich, da sich die Abkühlrate bei einer so hohen Tiefe stark verringern würde und damit dort keine vollständige martensitische Umwandlung des Gefüges mehr erfolgt (vgl. Abschnitt Modell). Insofern deckt diese Simulation den wesentlichen Bereich ab. Da sich das Härtetiefenverhältnis mit zunehmender Erwärmungszeit zwar immer weiter reduziert aber immer noch über 1 liegt, kann daraus abgeleitet werden, dass sich die Bedeutung der Frequenz bei langen Heizzeiten verringert aber auch dort immer noch einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss besitzt.

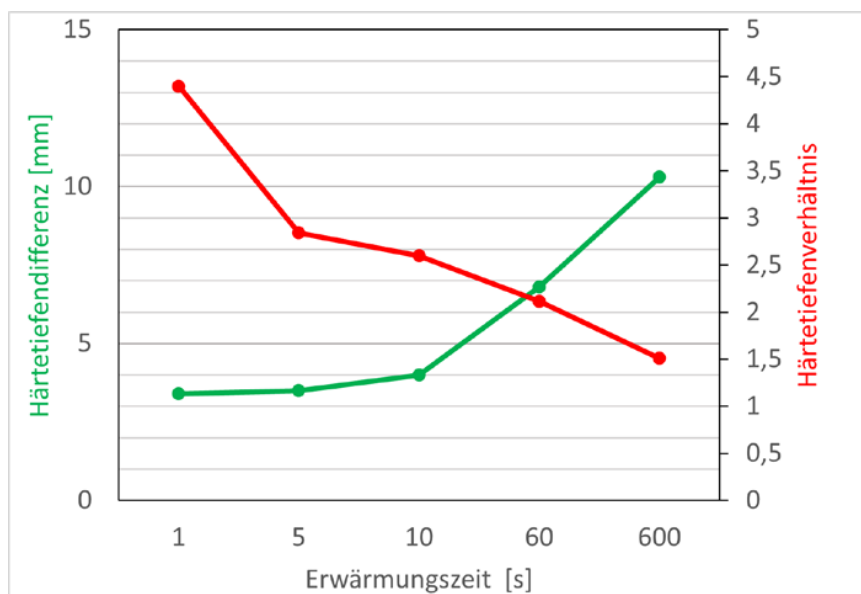


Bild 6: Einfluss der Erwärmungszeit auf die Differenz und das Verhältnis der Härtetiefen zwischen der geringsten (1 kHz) und der höchsten (1 MHz) Frequenz

Tabelle 1: Härtetiefen bei der geringsten (1 kHz) und der höchsten (1 MHz) Frequenz sowie die Differenz und das Verhältnis bei den unterschiedlichen Erwärmungszeiten

Heizzeit	1 kHz	1 MHz	Differenz	Verhältnis
1 s	4,4 mm	1 mm	3,4 mm	4,4
5 s	5,3 mm	1,9 mm	3,5 mm	2,8
10 s	6,5 mm	2,5 mm	4 mm	2,6
60 s	12,9 mm	6,1 mm	6,8 mm	2,1
600 s	30,5 mm	20,2 mm	10,3 mm	1,5

Fazit

Die Simulationen haben gezeigt, dass die Frequenz insbesondere bei kurzen Heizzeiten eine bedeutende Rolle beim induktiven Härten spielt. Bei einer Heizzeit von 1 s ist die Härtetiefe mit 1 kHz etwa 4,4-mal so hoch wie bei einer Erwärmung mit 1 MHz. Mit zunehmender Erwärmungszeit verringert sich aber das Verhältnis der Einhärtetiefen stark und beträgt bei 10 min Heizzeit nur noch etwa das 1,5-fache. Grundsätzlich ist daher die Aussage einer abnehmenden Bedeutung der Frequenz mit zunehmender Heizzeit richtig. Die Simulationen haben aber auch gezeigt, dass dieser Einfluss auch bei langen Erwärmungszeiten nicht vernachlässigbar ist. Somit hat die Frequenz auch bei langen Heizzeiten eine bedeutende Wirkung auf die Härtetiefe und ist bei hoher gewünschter Einhärtetiefe entsprechend niedrig auszulegen.

Literatur

- [1] Schlesselmann, D.: Methoden zur numerischen Berechnung, Analyse und Auslegung induktiver Randschichthärteprozesse unter Berücksichtigung von magnetischen Sättigungseffekten. Garbsen: PZH Verlag, 2016
- [2] Aliferov, A.; Forzan, M.; Lupi, S.: Pulse Induction Hardening in the Millise-

conds Range. Proceedings of XVIII International UIE-Congress on Electrotechnologies, 2017, S. 129-134

- [3] Fasholz, J.; Orth, G.: Induktive Erwärmung. Verfahrensinformation. Essen: RWE Energie, 1991
- [4] Schubotz, S.; Stiele, H.: Transformatoren und Überwachungssysteme in Erwärmungsanlagen. ewi — elektrowärme international 72 (2014), Nr. 3, S. 55-60
- [5] Schubotz, S.; Stiele, H.: Frequenzanpassung in induktiven Erwärmungsanlagen. ewi — elektrowärme international 75 (2017), Nr. 1, S. 51-57
- [6] Schubotz, S.: Energieversorgung für das induktive Härten. Online-Seminar Induktives Härten, Vulkan-Verlag, 2021
- [7] <http://www.nsgsoft.com/products/elita/>, "New Solutions Group. [Online]



Autor

Dr.-Ing. **Stefan Schubotz**
EFD Induction GmbH
Freiburg
+49 (0)761 / 8851-174
szs@de.efdgrou.net