



Verzugsminimiertes Induktionshärten von Kurbelwellen

Minimum distortion induction hardening of crankshafts

Von **Stefan Dappen, Farsad Amiri**

Beim Induktionshärten von Kurbelwellen treten insbesondere bei der Radienhärtung (Hohlkehlenhärtung) unerwünschte Verzüge am Bauteil auf. Das von SMS Elotherm patentierte Verfahren löst diese Problematik durch die Kombination aus Verzugssimulationen, geeigneter Härtefolge, gezielter Leistungssteuerung sowie einer speziellen mechanischen Werkstückhandhabung. Der folgende Beitrag stellt die Grundlagen und die aktuellen Techniken zum verzugsminimierten Induktionshärten vor.

On induction hardening of crankshafts, undesirable distortions occur on the workpiece, especially during fillet hardening. The process patented by SMS Elotherm solves this problem by a combination of distortion simulations, a suitable hardening sequence, systematic power control and special mechanical handling. This article presents the fundamentals and the current techniques of minimum distortion hardening.

Einleitung

Die extrem gestiegenen Kraftstoffpreise und die weltweite Forderung nach Senkung der CO₂-Emissionen führen zu einem Trend im Motorenbau, leichtere, kleinere und gleichzeitig leistungsfähigere Aggregate zu entwickeln. Dieses sog. Downsizing stellt höhere Anforderungen an Materialien und Mechanik der Mo-

torenkomponenten – insbesondere an die Kurbelwelle. Die Ansprüche an Biegegewichsefähigkeit sowie Verschleißfestigkeit dieser Präzisionsbauteile steigen damit deutlich an. Aus diesem Grund werden die speziellen Belastungszonen von Kurbelwellen durch Induktionstechnik anforderungsbezogen gezielt gehärtet. Allerdings führt dies prozess- und werkstoffbedingt zu einer Volumenaus-

dehnung und dadurch zu einem unerwünschten Verzug. Die Lösung ist das von SMS Elotherm entwickelte und patentierte Verfahren des verzugsminimierten Induktionshärtens für jede Art und Größe von Kurbelwellen.

Das induktive Härte-Verfahren

Das Härten als Verfahren zur Einstellung bestimmter Randschichteigenschaften basiert auf metallurgischen Umwandlungen infolge materialspezifischer thermischer Behandlungen. Der Härteprozess lässt sich in vier Phasen einteilen:

1. Aufheizen (**Bild 1**)
2. Halten
3. Abschrecken (**Bild 2**)
4. Ggf. Anlassen

Bild 2: Abschreckvorgang

Fig. 2: Quenching process

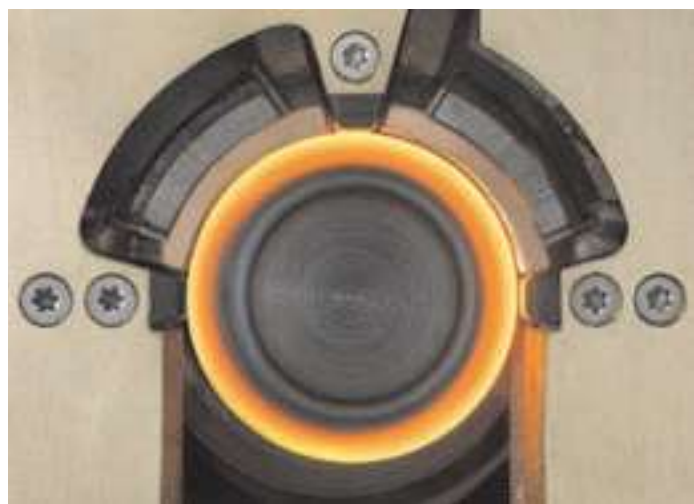


Bild 1: Induktor beim Aufheizen

Fig. 1: Inductor during heating





Bild 3: Härtemaschine für Großkurbelwellen bis 5000mm

Fig. 3: Hardening machine for large crankshafts up to 5000 mm

Ein essenzieller Vorteil der induktiven Wärmebehandlung liegt darin, dass innerhalb kurzer Zeit hohe Leistungsdichten (typisch 500–2000 W/cm²) für die Aufheizung der oberflächennahen Randschicht bereitgestellt werden.

Die eigentliche Ausbildung des Härtegefüges erfolgt nach Beendigung der Aufheizphase. Dazu muss der Austenit im zu härtenden Bereich gezielt abgeschreckt

werden. Das Ergebnis dieses Prozesses ist eine deutliche Härtesteigerung der Materialoberfläche im Vergleich zum Ausgangszustand. Aufgrund der Gefügedynamik bei den geforderten Abkühlraten ist die Martensitbildung ein äußerst anspruchsvoller Prozess, dessen Prozesssichere Beherrschung gleichermaßen ausgeprägtes prozess- und maschinentechnisches Knowhow erfordert.



Bild 4: Flexible Kurbelwellenhärtemaschine

Fig. 4: Flexible crankshaft hardening machine

Für das Abschrecken werden als Medien je nach Anwendungsfall kompressible sowie inkompressible fluide Medien eingesetzt (Gase, Wasser, Öle etc.). Die unterschiedlichen Medien zeichnen sich durch voneinander abweichende Abschreckwirkungen aus. Ein zu langsames Abschrecken führt zu einem bainitischen Endgefüge, während ein zu schnelles Abschrecken zu inakzeptablen Verzugerscheinungen sowie zu Rissbildungen führen kann. Es geht hierbei also um eine Abwägung zwischen der benötigten Endhärte, der Gefügequalität und dem Bauteilzustand nach dem Härten.

Die Martensitbildung führt zu einer massiven Festigkeitssteigerung. Allerdings nehmen dabei gleichzeitig auch Sprödigkeit und mechanische Spannungen zu. Um die unerwünschten mechanischen Spannungen in einem Bauteil auf ein akzeptables Maß abzubauen, wird das betreffende Werkstück häufig im Anschluss an den Härteprozess angelassen. Dies erfolgt i. d. R. bei Temperaturen zwischen 180 und 300 °C. Dieser Vorgang geht zwar mit einem Härteabfall einher, erhöht aber deutlich die Biegewechselfestigkeit.

Maschinenteknik für das Härten von Kurbelwellen

Für das Härten von Kurbelwellen sind unterschiedliche Maschinenkonzepte verfügbar. Wichtige Kriterien für die Auslegung einer Maschine sind:

- Kurbelwellengeometrie
- Härtespezifikation
- Anlassen
- Taktzeit
- Produktionsprogramm
- Logistik

Der Härteprozess bedingt ein perfektes Zusammenspiel von steuerungstechnisch überwachten mechanischen Bewegungen, Bereitstellung von elektrischer Induktionsleistung und des Abschreckmediums. Dies führt zu Maschinen unterschiedlicher Komplexität.

Ein wesentliches Merkmal der Kurbelwellen-Härteanlagen ist der Parallelschwingkreis zur Generierung der erforderlichen Induktionsleistung. Der Vorteil des parallelen Schwingkreises ist die spannungsabhängige Prozessführung. Dadurch wird eine Überhitzung des Materials und



somit ein Anschmelzen der Oberfläche bei Erreichen der Härtetemperatur verhindert.

Unabdingbare Bedingungen für alle Maschinentypen sind die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und die Verfügbarkeit der Anlage. Mit der langjährigen Erfahrung der SMS Elotherm auf dem Gebiet der Induktionstechnik – insbesondere das Knowhow zur Beherrschung hoher Ströme – werden die hohen Anforderungen der Anlagenbetreiber erfüllt:

- Konstante Betriebsparameter während des Betriebes
- Langzeitstabilität der Induktionswerkzeuge
- Hohe Verschleißfestigkeit und Belastbarkeit der Mechanik
- Überwachung der in das Werkstück induzierten Energie durch ein patentiertes Verfahren [1]
- Möglichkeit der Winkelsteuerung (Power Pulsing)

Das Anlagenportfolio der Kurbelhärtemaschinen von SMS Elotherm umfasst Maschinen für kleinere Stückzahlen, für Großkurbelwellen (**Bild 3**) sowie komplette automatische Bearbeitungszentren (**Bild 4**) mit Stundenleistungen bis zu 120 Kurbelwellen.

Bauteilverzug und Eigenspannungen

Der Induktionsprozess erzeugt bei der Gefügeumwandlung ein werkstoffabhängiges Volumenwachstum. Dies ist eine unerwünschte Reaktion, da es durch die erzeugten Spannungen zum Verzug der Kurbelwellen kommt. Die Art der Ausdehnung hat verschiedene Ursachen, die sich im Wesentlichen auf die ungleichmäßige Massenverteilung entlang der Kurbelwelle zurückführen lassen. Bei der reinen Laufflächenhärtung ist sie eher gering und führt fast ausschließlich zu einer axialen Dehnung. Durch vorausberechnete Längenvorhalte lässt sich dies einfach kompensieren.

Schwieriger ist die Situation bei der Radialhärtung. Hierbei wird die Kurbelwelle neben der axialen Dehnung auch an den Wangen aufgedrückt. Durch die Struktur der Welle ergeben sich somit Verzüge an benachbarten Lagern. Nur durch ein gezieltes Gegenhärten kann der Verzug ausgeglichen werden.

Bild 5: Härtefolge für eine Sechszylinder-Reihenwelle

Fig. 5: Hardening sequence for an in-line six cylinder crankshaft



Die durch den Härteprozess verursachten oberflächennahen Druckspannungen sind allerdings nicht die einzige Ursache für den Bauteilverzug. Die Kurbelwelle bringt meist schon fertigungsbedingte Eigenspannungen mit. Eigenspannungen in der Kurbelwelle entstehen bereits im Zuge ihrer Rohteilfertigung im Guss oder Schmiedeteil [2]. Durch die lokale Wärmeerbringung bei der Oberflächenhärtung werden die Eigenspannungen teilweise aufgelöst, dann aber mit den durch die Gefügeumwandlung beim Härten induzierten Spannungen überlagert. Die Folge: Es kann ein zunächst unerwarteter Bauteilverzug entstehen. Man nutzt heute die Möglichkeiten der Verzugssteuerung, die moderne Induktionsanlagen von SMS Elotherm bieten. Dazu ist es notwendig, die vorgeschalteten Prozesse so einzustellen, dass sie ein reproduzierbares und konstantes Eigenspannungsverhalten der Bauteile gewährleisten.

Auch die Geometrie der Kurbelwelle führt zu einem weiteren Verzug während des Oberflächenhärtens. Haupteinflussgrößen sind:

- die räumliche Orientierung der Einzelager
- die Überdeckung Hub- zu Hauptlager
- die Wangenstärke

Darüber hinaus ist die geforderte Härtezone eine wesentliche Einflussgröße. Der Härteverzug wird hierbei insbesondere

durch die Einhärtetiefe, speziell im Radius, und die Höhe der Härtezone am Anlaufbund bestimmt.

Verzugsminimiertes Induktionshärten

Mit der geeigneten Härtefolge und durch die richtige Leistungssteuerung lassen sich die Probleme des Härteverzuges lösen. Das von SMS Elotherm patentierte Verfahren hat in der Praxis bewiesen, dass es trotz unterschiedlichster Kurbelwellenbauformen zu den gewünschten Ergebnissen führt.

Härtefolge

Unter dem Begriff Härtefolge versteht man die zeitliche Abfolge der Einzellaagerhärtungen. Nach Analyse der Härtespezifikation, Materialdehnungseigenschaften und der geometrischen Abhängigkeiten wird die die Abfolge der Härteoperationen ermittelt und am Bauteil verifiziert. Eine optimierte Härtefolge ist hier am Beispiel einer Sechszylinderreihenwelle dargestellt (**Bild 5**).

Leistungssteuerung

Mit der Leistungssteuerung reagiert man beim induktiven Härteprozess auf verän-

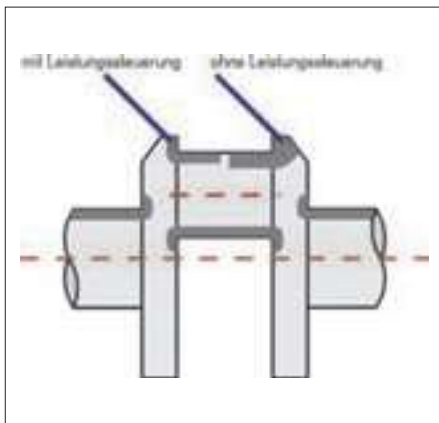


Bild 6: Leistungssteuerung

Fig. 6: Power control

derliche Masseverteilungen am Umfang eines Lagers. Dabei wird die Winkellage des Werkstücks während des Härtevorgangs laufend erfasst. Durch eine winkelabhängige Vorgabe der Heizleistung im vorgewählten Winkelbereich ist es möglich, das Schlagverhalten zu steuern. Bei Hublagern wird die Leistungssteuerung zur Vermeidung von Überhitzungen im Bereich des oberen Totpunkts verwendet (**Bild 6**). Bei Hauptlagern dient sie meist der Verzugssteuerung. Dort kann im Winkelbereich der Überdeckung mit dem benachbarten Hublager eine Beeinflussung des Verzugs erreicht werden.

Verzugssimulation

Für Anlagenbetreiber und Anlagenhersteller sind die optimale Härtefolge und der richtige Einsatz der Leistungssteu-

erung elementar. Dies erfordert große Werkstoff- und Werkstückerfahrung verbunden mit umfassendem Prozess-Knowhow. In jüngster Zeit bietet die numerische Verzugsberechnung eine gute Unterstützung – insbesondere für komplexe Werkstücke. Auf Basis eines 3D-Modells wird die Richtung des Härteverzugs ermittelt und eine geeignete Härtefolge und Leistungssteuerung ausgewählt. Auf **Bild 7 oben** erkennt man den Wellenverzug durch die gleichzeitige Härtung der Hublager. Die Welle erhält einen deutlichen Schlag und wird am Hauptmittellager nach außen gedrückt. Die nachfolgende Härtung mittels Leistungssteuerung ermöglicht das Zurückdrücken und führt zu einer deutlichen Verzugsminderung (**Bild 7 unten**).

Spannfutter-Gestaltung

Durch konstruktive Vorrichtungen bei den Härtemaschinen lässt sich ebenfalls eine deutliche Verzugsminimierung erzielen. Die speziell gestalteten und von SMS Elotherm patentierten Spannfutter [3] ermöglichen eine Längsdehnung der Kurbelwelle. Dazu übernimmt das eine Spannfutter den Rotationsantrieb, während das zweite Spannfutter diese Rotation überwacht und schwimmend gelagert ist. Somit wirken keine axialen Kräfte auf die Kurbelwelle ein, die zum Verzug führen könnten.

Stützlünetten

Die patentierten Stützrollen bzw. sogenannte Dreipunkt-Stützlünetten [4] wer-

den bei besonders verzugskritischen Kurbelwellen eingesetzt. Dadurch können auch Kurbelwellen mit sehr flexibler Geometrie einer tiefen Erwärmung unterzogen werden. Die Stützlünetten lassen sich zeitgesteuert einsetzen, z. B. während des gesamten Härteprozesses oder erst beim Abschrecken.

Fazit

Die bewährten SMS-Elotherm-Verfahren für das verzugsminimierte Härten überzeugen durch deutliche Vorteile gegenüber vergleichbaren, herkömmlichen Verfahren. Sie vermindern signifikant den Verzug der Welle beim Härteprozess, sodass die anschließende spanende Bearbeitung und die damit verbundenen hohen Werkzeugkosten minimiert werden. Insgesamt wird weniger Prozesszeit benötigt und die gesamte Produktionseffizienz steigt.

Literatur

- [1] Patent EP 0 427 879 B1, Vorrichtung und Verfahren zum induktiven Erwärmen von Werkstücken
- [2] Götz Hartmann, Lösung formtechnischer Fragestellungen mit rechnerischer Simulation, MAGMA GmbH, magmasoft.de
- [3] Patent DE 37 37 694 C1, Verfahren zum Betrieb einer Induktionshärtevorrichtung für Kurbelwellen und eine solche Vorrichtung
- [4] Patent DE 199 34 534 C1, Verfahren und Vorrichtung zum Härten der Lagerflächen von Kurbelwellen

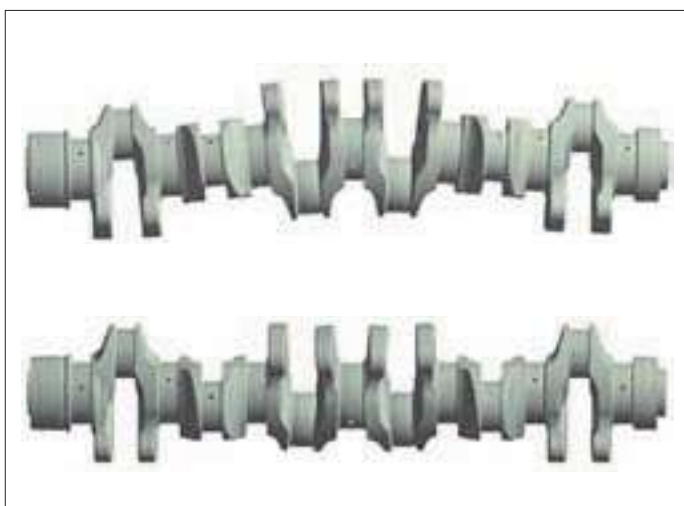


Bild 7: Verzugssteuerung einer Sechszylinder-Reihenwelle (Verzug überhöht)

Fig. 7: Distortion control of an in-line six cylinder crankshaft (distortion exaggerated)

Dr. Stefan Dappen
SMS Elotherm GmbH,
Remscheid

Tel.: 02191 / 891-204
s.dappen@sms-elotherm.de



Farsad Amiri
SMS Elotherm GmbH,
Remscheid

Tel.: 02191 / 891-321
f.amiri@sms-elotherm.de

