

# INDUKTIONSERWÄRMUNG

## treibt Windturbinen an

Präzise gesteuerte Systeme für die induktive Wärmebehandlung können selektiv spezielle Bereiche der Verzahnung und Lagerlaufringe härten, um die erforderlichen metallurgischen Eigenschaften bei minimaler Verformung zu erreichen und hochwertige Teile zu produzieren, die unmittelbaren Einfluss auf die Langlebigkeit von Windturbinen haben.

**Gary Doyon,  
Doug Brown  
und Dr. Valery Rudnev, FASM**  
Inductoheat Inc., Madison Heights, Mich.

**Frank Andrä**  
HWG-Inductoheat, Reichenbach, Deutschland

**Chirag Sitwala**  
Inductoheat-India, Ahmedabad, Indien

**Edison Almeida**  
Inductoheat-Brazil, Indaiatuba, SP, Brasilien

**W**ind ist eine unerschöpfliche Energiequelle, die nicht den Schwankungen des Brennstoffpreises unterliegt und frei von CO<sub>2</sub>-Emissionen ist (Abb. 1). Gemäß einem Bericht der American Wind Energy Association (AWEA) machte die Windenergie 2008, mit einer installierten Kapazität von über 8.500 MW, 42 % der gesamten neuen Erzeugungskapazität aus, die in den USA installiert wurde [1]. Ein Bericht des US-Energieministeriums (Department of Energy, DOE) aus dem Jahre 2008 geht davon aus, dass die Windenergie 20 % des Stromverbrauchs der Nation bis 2030 erzeugen könnte.

Da die meisten Windturbinen an entfernten Standorten gebaut werden, sind aufgrund der Größe und des Gewichts der Turbinen sowie der Kosten für ihre Reparatur überlegene Festigkeit und höhere Qualität der Komponenten eines Windkraftgenerators erforderlich. Die Qualität gehärteter großer Zahnräder und Laufringe (einfach oder doppelt) hat einen direkten Einfluss auf die Langlebigkeit von Windturbinen.

Inductoheat beliefert die Branche seit über 30 Jahren mit hochwertigen, wiederholbaren und exakt gesteuerten Systemen für die induktive Wärmebehandlung, die selektiv bestimmte Bereiche der Verzahnung und Lagerlaufringe härten können, um eine feinkörnige martensitische Schicht bei minimaler Formveränderung zu erzeugen.

Die übrigen Bereiche des Teils werden von dem Induktionsprozess nicht berührt. Härte, Verschleißfestigkeit, Kontaktmüdigkeitsfestigkeit und Stoßfestigkeit nehmen zu und tragen dazu bei, einen vorzeitigen Ausfall des Getriebes zu verhindern. Ein weiteres Ziel der induktiven Zahnradhärtung liegt darin, signifikante Druckeigenspannungen an der Oberfläche und in einem oberflächennahen Bereich zu erzeugen [2-4]. Druckspannungen tragen dazu bei, Rissbildung zu verhindern und Zugbiegeermüdung standzuhalten.

### Induktionshärtung großer Zahnräder

Die Leistungsmerkmale des Zahnrades (einschließlich Lastbedingungen und Betriebsumgebung) bestimmen die erforderliche Oberflächenhärte und Kernhärte, das Härteprofil, die Eigenspannungsverteilung, die Güteklasse des Stahls und die ursprüngliche Mikrostruktur des Stahls [2-4]. Im Gegensatz zum Aufkohlen und Nitrierhärten erfordert die Induktionshärtung keine Wärmebehandlung des gesamten Zahnrades oder Ritzels. Bei der Induktion kann die Wärmebehandlung auf jene Bereiche beschränkt werden, in denen metallurgische Veränderungen erforderlich sind.



Abb. 1 — Windenergie ist eine unerschöpfliche umweltfreundliche Energiequelle



Abb. 2 — Die induktive Einzelzahnhärtung kann für große äußere und innere Zahnräder und Ritzel angewendet werden und setzt voraus, dass der Induktor symmetrisch zwischen zwei Flanken benachbarter Zähne positioniert wird.



Abb. 3 — Bei der Einzelzahnhärtung können Induktoren darauf ausgelegt werden, selektiv spezielle Bereiche der Verzahnung zu härten, in denen metallurgische Veränderungen erforderlich sind (z.B. Fuß, Fußausrundung und/oder Flanke des Zahns), um eine feinkörnige martensitische Schicht bei minimaler Verformung zu erzeugen. Die übrigen Bereiche des Teils werden von dem Induktionsprozess nicht beeinflusst und behalten ihre Zähigkeit und Duktilität.



Abb. 4 — Anlage für die induktive Zahnhärtung für einen großen Lagerring, der in einer Windturbine zum Einsatz kommt. Die Zähne befinden sich am Innendurchmesser des Rings. Der Außendurchmesser des Lagerrings kann eine Größe von bis zu 140" (3.550 mm) aufweisen. Die erforderliche Härtungstiefe liegt bei 2,5 bis 3,5 mm. Die Vorschubhöhe auf der z-Achse (Zahnbreite) beträgt 13,75" (350 mm), und das maximale Gewicht liegt bei über 11.000 lb (5.000 kg).

Beispielsweise lassen sich die Flanken, Füße und Köpfe der Verzahnung selektiv härten.

Das Konzept der Einzelzahnhärtung eignet sich am besten für die Induktionshärtung großer Zahnräder, an Stelle der Umlaufhärtungstechnik, bei der das Zahnrad von einer Induktionsspule umgeben ist. Die Umlaufhärtung erfordert eine wesentlich höhere Energiemenge und Anlageninvestition, weil die voluminöse Metallmasse des großen Zahnrades gleichzeitig erwärmt werden muss.

Das Konzept der Einzelzahnhärtung kann für große äußere und innere Zahnräder und Ritzel angewendet werden und setzt voraus, dass der Induktor symmetrisch zwischen zwei Flanken benachbarter Zähne positioniert wird (Abb. 2 und 3). Es gibt viele verschiedene Spulenausführungen, die nach diesem Prinzip arbeiten, für eine endlose Anzahl von Zahnradtypen, Zahnprofilen und Größen. Induktoren können darauf ausgelegt werden, nur den Fuß und/oder die Flanke des Zahns zu erwärmen, so dass Kopf und Zahnkern weich, zäh und duktil bleiben (Abb. 3). Induktionsgehärtete Zahnräder können relativ groß sein, mit Außendurchmessern, die ohne Weiteres 100" (2,54 m) überschreiten, und ein Gewicht von mehreren Tonnen aufweisen.

Normalerweise wird die induktive Vorschubhärtung für die Einzelzahnhärtung von Zahnrädern mit breiten Flächen eingesetzt. Zwei Vorschubtechniken kommen zum Einsatz: Bei der einen Technik ist der Induktor stationär und das Zahnrad beweglich, bei der anderen ist das Zahnrad stationär und der Induktor beweglich.

#### Induktive Einzelzahnhärtung von Zahnrädern

Abbildung 4 zeigt ein Beispiel für eine Anlage für die induktive Einzelzahnhärtung für einen großen Lagerring, der in einer Windkraftturbine zum Einsatz kommt. Die Zähne befinden sich am Innendurchmesser des Rings. Der Außendurchmesser des Lagerrings kann eine Größe von bis zu 140" (3.556 mm) haben, und das maximale Gewicht beträgt mehr als 11.000 lb (5.000 kg). Die erforderliche Härtungstiefe liegt bei 2,5 bis 3,5 mm. Die Vorschubhöhe auf der z-Achse (Zahnbreite) beträgt 13,75" (350 mm). Präzise Techniken für die Induktorfertigung, Induktorsteifigkeit und überlegene Ausrichtungstechniken sind Voraussetzung. Häufig kommen spezielle Positioniervorrichtungen oder elektronische Nachführungssysteme zum Einsatz, um eine korrekte Positionierung des Induktors in der Zahnlücke zu gewährleisten.

Die Wärmedehnung des Metalls während der Erwärmung muss bei der Feststellung des geeigneten Abstands zwischen Induktor und Verzahnung ebenfalls berücksichtigt werden. Nach der Ringbestückung und der anfänglichen Spulenpositionierung läuft der Prozess auf der Basis einer Anwendungsformel automatisch.

Bei der Entwicklung von Systemen für die Einzelzahnhärtung ist den elektromagnetischen Enden-/Kanteneffekten sowie der Möglichkeit, das benötigte Muster in den Endbereichen des Zahnrades und entlang dem Zahnumfang zu erzeugen, besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Um die erforderliche Gleichmäßigkeit der Temperatur zu erhalten, muss ein komplexer Steuerungsalgorithmus verwendet werden: Leistungs- und Vorschubrate vs. Induktorposition.

Die Erwärmung der Zahnradenden mit kurzer Verweilzeit ist in der Anfangs- und Endphase der Induktorbewegung von wesentlicher Bedeutung. Die Verweilzeit am Ende des Erwärmungszyklus ist in der Regel kürzer als die Verweilzeit am Anfang des Induktorverfahrwegs.

Das Aufkohlen erfordert ein Durchwärmen der Zahnräder für viele Stunden (in einigen Fällen bis zu 30 Stunden oder länger) bei Temperaturen von 850 bis 950 °C. Bei diesen Temperaturen dehnen sich die großen Metallmassen weitaus stärker als bei einer Härtung, bei der nur die Oberflächenschicht des Zahnrades induktiv erwärmt wird. Die Dehnung einer großen Metallmasse während des Erwärmens/Durchwärmens und ihre Schrumpfung während des Kühlens/Abschreckens nach dem Aufkohlen führt zu einer wesentlich stärkeren Verformung des Zahnrades, verglichen mit der Formveränderung nach der Induktionshärtung, und erfordert eine zeitaufwendige Nachbearbeitung durch Schleifen.

Darüber hinaus weisen große Zahnräder, die beim Aufkohlen für viele Stunden Temperaturen von 850 bis 950 °C ausgesetzt werden, geringe Steifigkeit auf. Daher können sie durchbiegen und neigen dazu, während des Durchwärmens der Bewegung ihrer Trägerstrukturen zu folgen, was zu einer schlechten Vorhersagbarkeit und Wiederholbarkeit der Formveränderung führt. Während der induktiven Oberflächenhärtung dienen Bereiche, die nicht der Wärme ausgesetzt sind, hingegen als Formstabilisatoren und bewirken eine geringere, besser vorhersagbare Formveränderung.

Bei der induktiven Einzelzahnhärtung ist die Form-/Größenveränderung hauptsächlich in der letzten Erwärmungsposition feststellbar, wenn der letzte Zahn vorgeschoben wird. Die Härtung jedes zweiten oder dritten Zahns kann die Verformung erheblich minimieren. Selbstverständlich erfordert dies zwei bis drei Umdrehungen, um das gesamte Zahnrad zu härten.

Eine der Herausforderungen bei der Einzelzahnhärtung steht mit einer unerwünschten Erwärmung der Bereiche neben dem gehärteten Bereich in Zusammenhang (Rückhärtungseffekt). Es gibt zwei Hauptgründe für eine unerwünschte Rückhärtung [2-4]. Der erste Grund hängt mit dem Phänomen der externen magnetischen Feldkopplung des Induktors zusammen [4]. Der zweite Grund bezieht sich auf das Phänomen der Wärmeleitfähigkeit. Wärme wird durch Wärmeleitung von einem Hochtemperaturbereich der Zahnoberfläche zu einem Bereich mit geringerer Temperatur übertragen. Gemäß dem *Fourierschen Gesetz* ist die Wärmeübertragungsrate proportional zur Temperaturdifferenz und zum Wert der Wärmeleitfähigkeit. Stähle und Gusseisen weisen eine relativ gute Wärmeleitfähigkeit auf. Während der Härtung erreicht die Oberflächentemperatur einen relativ hohen Wert, der die kritische Temperatur  $A_{c3}$  übersteigt. Daher besteht beim Erwärmen einer Seite des Zahns die Gefahr, dass die gegenüberliegende Seite der Verzahnung durch Wärmeleitung auf eine unangemessen hohe Temperatur erwärmt wird, was zu einer unerwünschten Rückhärtung der zuvor gehärteten Bereiche des Zahns führt. Ob eine gehärtete Fläche eines Zahns tatsächlich aufgrund von Rückhärtung erweicht wird, hängt von der angewendeten Frequenz, dem Zahnradmodul, der Zahnform, der Erwärmungszeit sowie der Härtungstiefe ab. Bei geringer bis mäßiger Härtungstiefe und großen Zähnen weisen der Fuß des Zahns, seine Fußausrundung sowie der Boden der Zahnflanke normalerweise keine übermäßige Wärme auf, da der massive Bereich unterhalb des Zahnfußes als nennenswerter Wärmeableiter dient. Er trägt dazu bei, überschüssige Wärme abzuleiten, und schützt die zuvor gehärtete Seite des Zahns vor unerwünschter Rückhärtung. Andererseits können der Zahnkopf und der obere Teil der Zahnflanke als "Problembereiche" betrachtet werden, da sie ein Potenzial für Rückhärtung aufweisen [2-4].



Abb. 5 — InductoScan Basiskompaktmaschine für die induktive Vorschubhärtung von Lagerringen. Die Ringe werden mit einem Kran in die Bestückungsposition geführt. Die Vorschubhärtung wird durch eine Siemens 840D-Steuerung geregelt.

Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Metallmasse am Zahnkopf relativ klein ist. Außerdem muss die Wärme nur eine kurze Distanz von der einen Seite (Erwärmung) zur anderen Seite (bereits gehärtet) des Zahns zurücklegen. Um das Problem der Rückhärtung zu überwinden, werden spezielle Kühlprühlöcke eingesetzt. Zusätzliche Kühlung schützt bereits gehärtete Bereiche während der Erwärmung ungehärteter Bereiche des Zahnades. Aber trotz der externen Kühlung kann, in Abhängigkeit von der Zahnform und den Prozessparametern, eine gewisse unvermeidbare Rückhärtung auftreten. Diese Rückhärtung ist normalerweise nicht signifikant, gut kontrolliert und akzeptabel (Abb. 3). In einigen Fällen kommt die Technik der induktiven Tauchhärtung zum Einsatz [4].

### Induktionshärtung von Laufringen

Ähnlich wie bei der Zahnradhärtung gibt es auch für die induktive Härtung großer Laufringe zwei Basisansätze, nämlich einen "Single-Shot"-Härtungsprozess (statisch) oder einen Vorschubprozess. *Single-Shot-Laufringhärtung:* Bei der statischen induktiven Erwärmung ist der Ring von einer eingängigen oder mehrgängigen Magnetspule umgeben. Um beispielsweise die Oberfläche des Innendurchmessers eines Lagerlaufrings zu härten, wird eine Induktionsspule innerhalb des Rings positioniert. Wenn hingegen eine wärmebehandelte Härteschicht auf dem Außendurchmesser des Laufrings erforderlich ist, wird die Induktionsspule um den Außendurchmesser

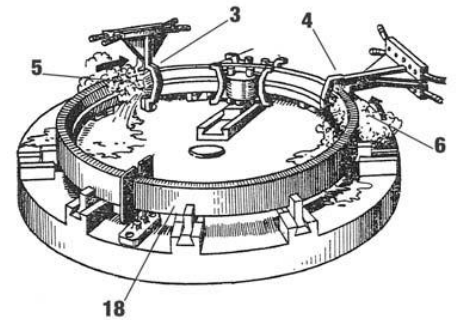


Abb. 6 — Prozesskonzept, das eine Eliminierung von Weichflecken durch den Einsatz von zwei Vorschubinduktoren ermöglicht (Lit. 5 entnommen).

angeordnet, so dass sie den zu erwärmenden Ring umgibt. Der Ring kann während der Wärmebehandlung gedreht werden (umlaufen), um eine gleichmäßige Verteilung der Energie über seinen Umfang während des gesamten Erwärmungszyklus zu gewährleisten. Nach Beendigung der Erwärmungsphase wird der Ring in ein separates konzentrisches Abschrecksprüherät unter dem Induktor abgesenkt und vor Ort im Sprüherfahren abgeschreckt oder in einen Abschreckbehälter eingetaucht, wobei das Abschrecken innerhalb des Behälters stattfindet, während das Abschreckmittel normalerweise bewegt wird.

Einer der Hauptnachteile der Single-Shot-Härtung hängt damit zusammen, dass die Induktionsspule mit einer beträchtlichen Energiemenge versorgt werden muss, da die gleichzeitige Erwärmung Energie in einer ausreichenden Größenordnung erfordert, um die Temperatur der gesamten Oberfläche des Rings auf den benötigten Wert zu erhöhen und die erforderliche Tiefe zu erreichen.

Daher werden Hochleistungswärmequellen benötigt, die hohe Ausrüstungskosten mit sich bringen.

**Vorschubhärtung:** Bei der induktiven Vorschubhärtung bewegt (schiebt) sich ein kurzer Induktor in einer kreisförmigen Bahn konzentrisch zum Ring (am Ringumfang entlang). Ein Sprühabschreckblock (Abschreckdüse) folgt dem Induktor oder ist in die Konstruktion des Induktors einbezogen. Diese Methode erfordert erheblich weniger Energie als der Single-Shot-Prozess, da nur kleine Bereiche des Rings nacheinander erwärmt werden.

Ein Beispiel ist in Abb. 5 dargestellt. Sie zeigt eine InductoScan™ Basiskompaktmaschine für die Vorschubhärtung von Lagerringen. Der Transformator ist auf einem federgelagerten x-y-Schlitten montiert. Die Ringe werden mit einem Kran in die Bestückungsposition geführt. Die Komponente wird dann in die Härtingsstation transportiert, wo sie zur Spule (die mit Führungen ausgestattet ist) hin bewegt wird. Somit ist ein präziser Kopplungsabstand für den gesamten Härtingsprozess gewährleistet. Das Teil dreht sich dann für die Vorschubhärtung über eine kreisförmige Achse. Der erwärmte Teil des Rings wird während der Vorschubhärtung mit einer Sprühvorrichtung abgeschreckt. Die Vorschubgeschwindigkeit beträgt 0,5"/s (12 mm/s). Der Außendurchmesser des Lagerrings beträgt bis zu 55" (1.400 mm), und die typische Härtingtiefe liegt bei etwa 0,100 bis 0,120" (2,5 bis 3 mm).

Die Vorschubhärtung von Laufringen mit einem einzelnen Induktor ist unkompliziert und stellt den wirtschaftlichsten Ansatz dar, der minimale Investitionskosten erfordert und die einfachste Steuerungs- und Maschinenausführung verwendet. Ein schmaler Weichbereich (Übergangszone) wird jedoch mit dieser Technik aufgrund des Rückhärtungseffektes in dem Bereich, der an den letzten zu härtenden Ringabschnitt grenzt, unumgänglich erzeugt.

Spezielle Methoden wurden entwickelt, um die Länge der Übergangszone auf ein Minimum zu beschränken. In einigen Fällen ist ein winkelförmiger Bereich einem geraden Übergangsbereich vorzuziehen.

Um eine rückgehärtete, weiche Zone zu verhindern, ohne eine unangemessen große, teure Energiequelle einzusetzen, wurde ein alternativer Prozess entwickelt. Gemäß dieser Methode (Abb. 6) wird an Stelle eines einzelnen Induktors ein Paar Heizinduktoren verwendet (Nr. 3 und 4 in Abb. 6). Zu Beginn des Erwärmungsprozesses wird den beiden Induktoren eine identische Energiemenge zugeführt, während sie jeweils in einem Bogen von etwas weniger als 180 Grad bei gleichmäßiger Geschwindigkeit in entgegengesetzter Richtung verfahren. Jedem Induktor folgt/folgt eine dazugehörige Abschreckdüse, die in den Induktor integriert ist, oder separate Abschreckblöcke (Nr. 5 und 6 in Abb. 6), bis die Induktoren am Ende des Erwärmungsprozesses in der letzten Erwärmungsposition wieder zusammenlaufen.

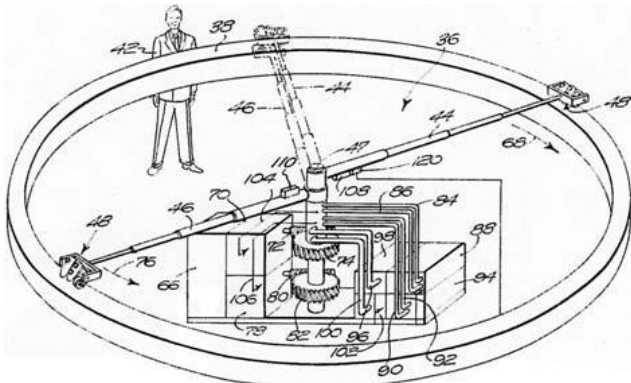


Abb. 7 — Eine der frühesten Beschreibungen der Oberflächenhärtung großer ringförmiger Komponenten ohne Weichflecken unter Einsatz von zwei unabhängigen Vorschub-Heizelementen (Lit. 9 entnommen).

Dort werden sie abgeregelt und gleichzeitig wird automatisch eine Hilfsabschreckung aktiviert, um den letzten erwärmten Bereich des Rings abzuschrecken. Die benachbarten Induktoren ergänzen das Magnetfeld des jeweils anderen Induktors in der letzten Erwärmungsposition und eliminieren damit Weichzonen, die durch eine unerwünschte Rückhärtung verursacht werden, wenn ein einzelner Induktor zum Einsatz kommt.

Die Beschreibung des Prozesskonzeptes, das die Eliminierung von Weichflecken durch den Einsatz von zwei Vorschubinduktoren ermöglicht (Abb. 6), wurde aus einem russischen Text [5] übernommen, der bereits in den späten 1970er Jahren veröffentlicht wurde. Dies war jedoch nicht die erste Beschreibung einer Vorschubhärtung mit Eliminierung von Weichflecken durch Verwendung von zwei Heizelementen, die sich unabhängig voneinander bewegen. Derartige Beschreibungen gab es bereits in den frühen 1940er Jahren [6-9]. Abbildung 7 wurde beispielsweise einem Patent entnommen, das in den frühen 1960er Jahren erteilt wurde [9].

Inductoheat setzt seine Tradition der wesentlichen Verbesserung existierender Techniken fort und hat vor Kurzem eine neuartige Technologie entwickelt (Patent angemeldet), die den bekannten allgemeinen Prozess zur Eliminierung von Weichflecken bei der Härtung großer ringförmiger Komponenten unter Einsatz von zwei Induktoren, die sich unabhängig voneinander vorschieben, weiter perfektioniert [10]. Diese Technologie verwendet umfangreiches Know-how, das speziell für die Erfordernisse der Induktionshärtung von Komponenten für Windkraftwerke entwickelt wurde.

Einige Innovationen beziehen sich auf die einzigartigen Fähigkeiten der Umrichter von Inductoheat, mit denen Energie und Frequenz während des Vorschubs unabhängig geregelt werden, was zur Optimierung der thermischen Bedingungen in den Anfangs- und Endstufen des Vorschubs beiträgt. Andere Funktionen haben mit Prozessfeinheiten und -formeln sowie mit dem effektiven Handling großer Teile zu tun. Der Erfolg dieser Entwicklung ist innovativen Ideen zuzuschreiben, die das weltweite Inductoheat-Team mit internationalen Experten aus verschiedenen Ländern – USA, Deutschland, Indien und Brasilien – entwickelt.

## Literatur

1. Windpower Outlook – 2009, American Wind Energy Association (AWEA), 2009.
2. V. Rudnev, Induction hardening of gears and critical components: Part 1, *Gear Technology*, S. 58-63, Sept., 2008.
3. V. Rudnev, Induction hardening of gears and critical components: Part 2, *Gear Technology*, S. 47-53, Nov., 2008.
4. V. Rudnev, et. al., *Handbook of Induction Heating*, Marcel Dekker, 2003.
5. A.D. Demichev, *Induction Surface Hardening*, Mashinostroenie, St. Petersburg, Russland, 1979.
6. D.A. Hay, Heat treating device, US-Patent Nr. 3,036,824, 29. Mai 1962.
7. J.H. Bridle, Heat treatment of ring-shaped articles, Britisches Patent Nr. 735,378, 30. April 1954.
8. L.J. Stevenson, et. al., Method and apparatus for flame hardening, US-Patent Nr. 2,410,134, 29. Okt. 1946.
9. R.B. Mitchell, Flame hardening process and apparatus, US-Patent Nr. 2,282,670, 12. Mai 1942.
10. Inductoheat-Konzernbericht, 24. April 2009.

Nähere Informationen erhalten Sie über:

Herr Frank Andrä, Geschäftsführer der HWG Inductoheat GmbH, Ostweg 5, 73262 Reichenbach, Tel.: +49 (0)7153/504210 email: andrae@hwg-inductoheat.de; www.hwg-inductoheat.de