

# „Hart am Wind“ – Induktionshärten von Großringen für Windkraftanlagen

„Hard into the wind“ – Induction Hardening of large rings for wind turbines

Otto Carsen, Stefan Dappen, Dirk M. Schibisch

Die Rolle der Windkraft als Hauptquelle erneuerbarer Energie wird sich durch die Zunahme an Offshore-Windparks weiter verstärken. Um diese wirtschaftlich betreiben zu können, müssen vor allem die dynamisch belasteten Komponenten wie Drehverbindungen und Lager nahezu wartungsfrei sein. Das Fertigungsverfahren der Wahl zur Erzeugung harter und damit verschleißresistenter Oberflächen ist das induktive Härten. Durch induktive Erwärmung und gezieltes Abkühlen (Abschrecken) wird die Gefügestruktur definiert verändert – der Werkstoff wird hart. Dieser physikalische Effekt wird sowohl für Verzahnungen als auch für Laufbahnen genutzt. Zur Erreichung optimaler und reproduzierbarer Härtergebnisse sind unterschiedliche Maschinenkonzepte verfügbar, die Universallösung stellt dabei eine schwenkbare Bauform dar, die sowohl Verzahnungen als auch Laufbahnen mit optimierter Kühlwasserführung bearbeiten kann. Weitere von SMS Elotherm patentierte Systeme wie die Werkstückwirkleistungsmessung oder sensorunterstützte Lagekorrektur des Induktionswerkzeugs machen das induktive Härten insgesamt zu einem Fertigungsverfahren, das sich durch hohe Reproduzierbarkeit und einfache Integration in die Produktion auszeichnet.

Wind power, especially from offshore wind farms, as renewable energy technology will play a decisive role in the future's energy supply. An economical operation of dynamically highly loaded components, e.g. rotary joints and bearing rings, requires a nearly maintenance-free design. The preferred production method for creating hard and thus wear resistant surfaces is the induction hardening technology. The material's structure is metallurgically modified by induction heating and subsequent defined cooling (quenching) – the material hardens. This physical effect is being used for toothed rings as well as bearing raceways. Different machine concepts are available for optimum and reproducible hardening results, the most universal one describes a machine with a tilt table, which allows an optimized flow of the quenching media depending on hardening teeth or raceways. Additional systems, patented by SMS Elotherm, e.g. workpiece power measurement or sensor assisted positioning of the induction tool turn the induction hardening into a manufacturing method, which is characterized by high reproducibility and easy integration into existing productions.

## Die Bedeutung der Windenergie

Heute deckt die Windenergie bereits den Strombedarf von fast 8 Millionen Haushalten. Bis 2025 sollen schon 25% der elektrischen Energie in Deutschland von Windkraftträdern bereitgestellt werden – davon, so die Planung, rund die Hälfte

aus küstenfernen Offshore-Anlagen. Auf dem Meer sind die Windgeschwindigkeiten höher und kontinuierlicher. Die Energieausbeute liegt deshalb offshore um bis zu 40 Prozent höher als an Land.

Auf der anderen Seite ist die Reparatur und Wartung auf hoher See deutlich aufwendiger und somit kostenintensiv. Hier können induktiv gehärtete Kom-

ponenten helfen, die Verschleißfestigkeit des Gesamtsystems zu erhöhen und Servicekosten zu minimieren.

## Wo findet die Induktionstechnik in der Windkraft Anwendung?

In Windkraftanlagen werden an mehreren Stellen Lager benötigt, die über die Betriebszeit von mehr als 20 Jahren wartungsfrei laufen müssen. An diese Großwälzlager zur Bewegung des Turmes (Azimutlager), zur Rotation der Flügel (Hauptlager) und zu deren Verstellung (Pitchlager) werden hohe Anforderungen gestellt.

Um die Bauteil- und Verschleißigenschaften zu verbessern, werden zum einen die Verzahnungen und zum anderen die Laufbahnen an den Stellen gehärtet, an denen sie im späteren Betrieb mit anderen Komponenten in Kontakt kommen.

Die Induktionshärtung leistet hier einen entscheidenden Beitrag: kurze, energiesparende Bearbeitungszeiten in der Fertigung durch exzellente und reproduzierbare Härteergebnisse.

## Kennzeichen verschiedener Oberflächenhärteverfahren

Unterschiedliche Wärmebehandlungen werden zur Verbesserung der Bauteileigenschaften von Großwälzlageringen eingesetzt.

Nachstehend sind die Merkmale unterschiedlicher Verfahren kurz beschrieben (**Tabelle 1**).

## Oberflächenhärteverfahren:

Induktionshärten	Flammhärten	Einsatzhärten	Nitrieren
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gleichmäßiges Aufheizen der zu härtenden Stellen</li> <li>• Kurze Erwärmungszeiten (geringe Zunderbildung, keine Grobkornbildung)</li> <li>• Kaum Nacharbeit nötig; geringer Verzug</li> <li>• Sichere Beherrschung der Wärmezufuhr, Temperatureinhaltung</li> <li>• Partielle Härtung auch bei schwierigsten Formen</li> <li>• Induktoren beliebig formbar</li> <li>• Auch sehr große und schwere Bauteile können gehärtet werden</li> <li>• Einfach in Fertigungslinie integrierbar, Automatisierung</li> <li>• Geringer Platzbedarf, einfache Bedienung, betriebssicher</li> <li>• Umweltfreundlich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kurze Erwärmungszeiten</li> <li>• Kaum Nacharbeit nötig; geringer Verzug</li> <li>• Partielle Härtung möglich</li> <li>• Geringer Platzbedarf, einfache Bedienung</li> <li>• Temperaturungenauigkeit wegen schwankenden Gasdruck und –zusammensetzung (Unterhärtung, Überhitzungsgefahr)</li> <li>• Schlechte Reproduzierbarkeit der Einhärtungstiefe</li> <li>• Verschiedene Brenner für einzelne Bauteile</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dünne, aber gleichmäßige Härteschicht</li> <li>• Partielle Härtung möglich</li> <li>• Hohe Betriebskosten, hoher Energieaufwand</li> <li>• Lange Glühzeiten</li> <li>• Evtl. stärkerer Verzug</li> <li>• Abdeckung nicht zu härtender Stellen</li> <li>• Zentrale Härterei ist erforderlich (Transportkosten)</li> <li>• Nacharbeit (säubern) nötig</li> <li>• Härte- und Härtetiefenabfall zum Zahngrund bei großen Zahnrädern</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wegen der geringen Einhärtung ist die Anwendung des Nitrierens im Bereich des Ringhärtens eingeschränkt</li> </ul>

Tab. 1: Oberflächenhärteverfahren

Table 1: Surface hardening technology

Durch die sichere Prozessführung bilden sich beim Induktionshärten die Härtezone gleichmäßig und reproduzierbar aus. Der hohe Automatisierungsgrad des Prozesses gewährleistet dabei eine gleichbleibende Qualität.

Bild 1: Einzelzahnhärtung

Fig. 1: Single Tooth Hardening



## Induktionsprinzip

Das induktive Randschichthärten basiert auf dem Induktionsgesetz. Unter dem Einfluss eines zeitlich veränderlichen magnetischen Feldes wird eine elektrische

Bild 2: Fertig gehärtete Verzahnung

Fig. 2: Finish hardened teeth



Spannung induziert, die einen Stromfluss im Werkstück und damit eine Erwärmung verursacht.

Durch die Stromverdrängung nimmt die Erwärmung von der Oberfläche zum Werkstückinneren ab. Dieser Effekt kann durch die Wahl der Frequenz gesteuert werden. In dem Bereich der Einwärmtiefe, in dem das Material auf Austenitierungstemperatur gebracht wird, entsteht nach dem Abschrecken die gewünschte Härteschicht durch eine Gefügeumwandlung zum Martensit.

## Verzahnungen

Für die induktive Randschichthärtung der Zähne von Innen- und Außenringen an Großwälzlagern wird die Zahnflächenhärtung eingesetzt (Bilder 1 und 2). Die Zahnflanken sowie der Zahngrund werden gehärtet, im Zahnkopfbereich verbleibt eine Weichzone. Je nach Einhärtungstiefe wird eine Frequenz zwischen 4 und 30 kHz eingestellt. Zur Durchsatz-erhöhung ist eine zeitgleiche induktive Härtung von mehreren Zähnen möglich.



**Bild 3:** Induktionshärteanlage Typ ZHM, Werkstück liegt horizontal

**Fig. 3:** Induction Hardening Machine Type ZHM, horizontally positioned ring



**Bild 4:** Induktionshärteanlage Typ RHM, Werkstück liegt schräg (70°)

**Fig. 4:** Induction Hardening Machine Type RHM, ring tilted (70°)

## Laufbahnen

Für die induktive Randschichthärtung der Laufbahnen kommen drei Verfahrensprinzipien zur Anwendung:

1. Vorschubhärtung mit Weichzone
2. Vorschubhärtung ohne Weichzone
3. Gesamtflächenhärtung ohne Weichzone

**Bild 5:** Induktionshärteanlage Typ RHM-S mit Vorwärmung, Werkstück ist von 0–70° schwenkbar

**Fig. 5:** Induction Hardening Machine Type RHM-S incl. Pre-Heating, ring tilting from 0–70°



## Vorschubhärtung mit Weichzone

Die Vorschubhärtung mit Weichzone ist das Standardverfahren für die Laufbahnhärtung. Der Induktor ist mit einer Brause ausgestattet und, abgesehen von den Stellachsen zur Anpassung an das Werkstück, weitgehend ortsfest. Der Ring dreht in langsamer Geschwindigkeit daran vorbei. Wenn Einhärtetiefen oberhalb von 6mm erreicht werden sollen, wird mit einer vorlaufenden induktiven Erwärmung gearbeitet. Als Folge entsteht prinzipbedingt am Ende des Umlaufs eine Weichzone.

Die **Bilder 3 und 4** zeigen einige Maschinen, auf denen sowohl Verzahnungen als auch Innen- und Außenlaufbahnen gehärtet werden können. Sie unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Werkstücklage, um das Abschreckmedium in Abhängigkeit der Härteaufgabe optimal zu führen.

Bei der Härtung der Verzahnung ist eine horizontale Werkstücklage, bei Laufbah-

nen eine schräge oder vertikale Werkstücklage vorteilhaft.

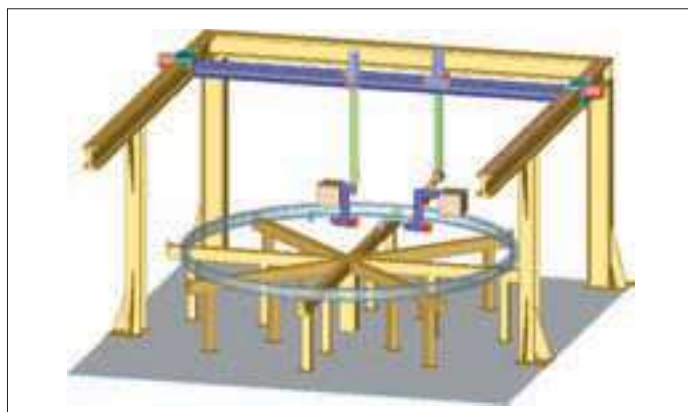
Auf der automatisch schwenkbaren Maschinenvariante ist eine optimale Prozessführung für beide Anwendungsfälle gewährleistet (**Bild 5**). Heute werden bereits Maschinen für Ringabmessungen bis 6000 mm Außendurchmesser und einem Stückgewicht bis 20 Tonnen realisiert.

## Vorschubhärtung ohne Weichzone

Bei der von SMS Elotherm patentierten [1] induktiven Vorschubhärtung ohne

**Bild 6:** Ringhärtemaschine zum schlupffreien Härten (Prinzip)

**Fig. 6:** Machine for Hardening rings without soft zone (principle)





**Bild 7:** Induktionshärteanlage Typ UVH, Werkstück liegt horizontal  
**Fig. 7:** Induction Hardening Machine Type UVH, horizontally positioned ring

tor ermöglicht bei ausreichender Anlagenleistung die gleichzeitige Vorschubhärtung beider Laufbahnen. **Bild 8** zeigt beispielhaft einen Heizleiter für eine solche Anwendung.

Beim Einzelinduktor besteht immer wieder die Gefahr, dass beim Härten der zweiten Bahn die erste Bahn angelassen wird. Dies kann beim Doppelinduktor nicht passieren.

Der Trend zu kompakten Ringbauformen bei gleichzeitig hohen Einhärte tiefen führt allerdings zu schmalen Mittelstegen zwischen den Laufbahnen. Hier kann es zu einer Durchhärtung des Stegs kommen, was aber in den meisten Anwendungen unerwünscht ist. Durch ein von SMS Elotherm zum Patent angemeldetes Induktordesign wird dies sicher und zuverlässig verhindert.

In der numerischen Simulation (**Bild 9**) zeigt sich die Ausbildung der austenitierten Zone (grau). Eine Durchhärtung wird vermieden.

Ergänzt durch eine Stegkühlung kann der Doppelinduktor sogar bei sehr dünnen Stegen Einsatz finden (**Bild 10**).

### Werkstückwirkleistungsmessung als Mittel zur Qualitätssicherung

Neben fertigungsbedingten Toleranzen gibt es eine thermische Verformung des Rings im Verlauf der Laufbahnhärtung. Um eine gleichbleibende Härtequalität zu erzielen, wird die Induktorposition der Lage der Laufbahn zwar nach-

Weichzone wird mittels induktiver Erwärmung das Werkstück an einer Startposition mit zwei Induktoren auf Härtetemperatur gebracht und nachlaufend abgeschreckt (**Bild 6**). Beide Induktoren mit Abschreckbrausen bewegen sich gegenläufig entlang des Werkstückes und härten dabei im Vorschub jeweils die Hälfte der Laufbahn. Gegenüber der Startposition laufen die Heizzonen beider Induktoren zusammen. Dort wird durch eine stationäre Brause abgeschreckt. So entsteht ein gehärtetes Werkstück ohne Weichzone. Dabei ist die Anlagentechnik durch das Vorschubverfahren hinsichtlich der installierten Leistung auch bei großen Ringen noch wirtschaftlich darstellbar.

### Gesamtflächenhärtung ohne Weichzone

Bei der Gesamtflächenhärtung rotiert der Ring mit höherer Umfangsgeschwin-

digkeit am Induktor vorbei, wird in mehrfachen Umläufen auf Härtetemperatur erwärmt und danach komplett abgeschreckt (**Bild 7**).

Die induktive Gesamtflächenhärtung ist in der Regel für kleine Ringdurchmesser sinnvoll. Die Kosten der Härteanlage und des Umfeldes steigen mit zunehmendem Durchmesser durch den hohen Bedarf an elektrischer Leistung und Kühlung erheblich.

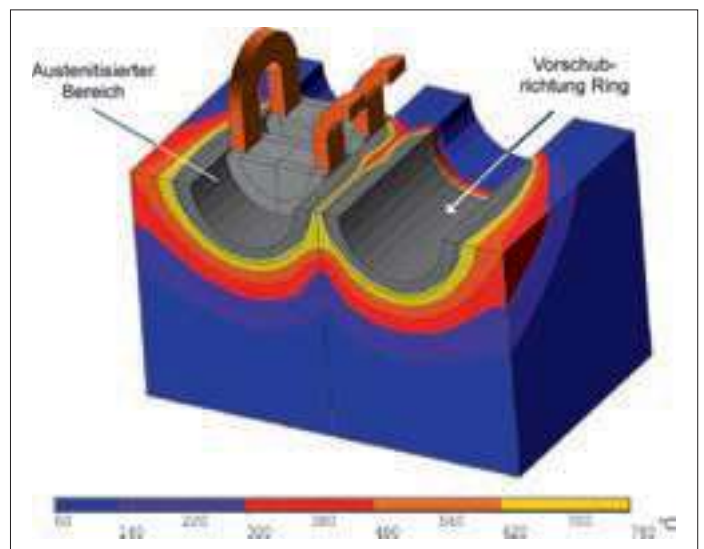
### Doppelreihige Kugellaufbahnen

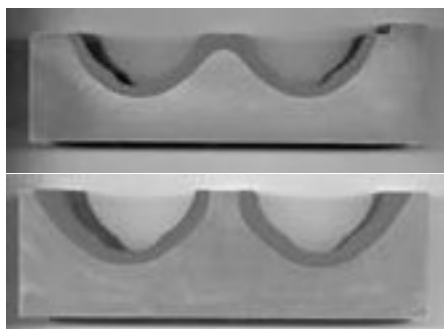
Bei der Laufbahnhärtung von doppelreihigen Wälzlagern ist die Verwendung eines Doppelinduktors besonders interessant, da die Produktivität nahezu verdoppelt werden kann. Der Doppelinduk-

**Bild 8:** Doppelinduktor (Beispiel)  
**Fig. 8:** Twin Inductor (example)



**Bild 9:** Numerische Temperaturberechnung eines Doppelinduktors  
**Fig.9:** Finite element temperature calculation for a twin inductor





**Bild 10:** Optimierte Härtung mit Doppelinduktor bei schmalen Stegen

**Fig. 10:** Optimized Hardening with twin inductor for raceways with narrow intermediate section

geführt; verbleibende Streuungen in der Ringhärtequalität können aber mit konventionellen Techniken prozessbegleitend nicht ermittelt werden. Da die technischen Anforderungen z. B. Standzeit und Flächendruck an die Lagerlaufbahnen kontinuierlich steigen, besteht die Notwendigkeit diese verbleibende Streuung in der Härtequalität weiter zu minimieren. Hierzu ist es erforderlich, elektrische Prozessparameter online während des Härteprozesses zu erfassen. Die Beeinflussung der elektrischen Messwerte, insbesondere der Umrichterleistung, ist zu bei konventionellen Anlagen zwar zu erkennen, aber wegen

**Bild 12:** Sensoren zur Induktorkorrektur

**Fig. 12:** Sensors for correction of the inductor position



der kleinen Signalpegel kaum auswertbar.

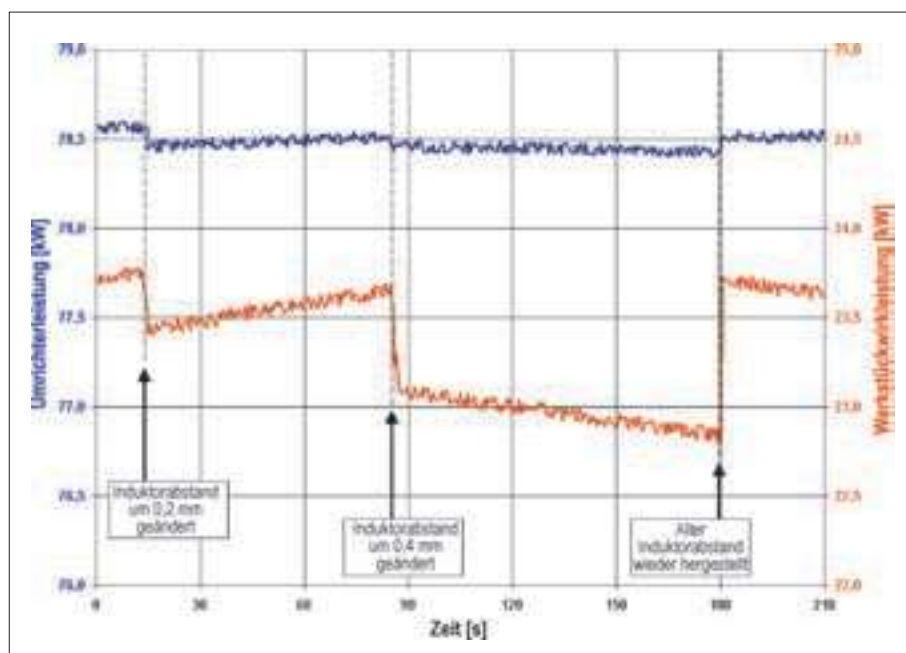
Mit Hilfe des von SMS Elotherm patentierten Verfahrens der Werkstückwirkleistungsmessung [2] ergibt sich demgegenüber eine sichere Qualitätsbewertung. Bisherige Leistungsmessungen nutzen die phasenrichtige Multiplikation von Umrichterstrom und -spannung. Allerdings sind in dieser Leistung noch die Verluste aller Bauteile einschließlich des Induktors enthalten. Mit der Messung

der Werkstückwirkleistung können diese Verluste erfasst und von der Umrichterleistung abgezogen werden. Man erhält nur die für den Härteprozess relevante und ins Werkstück induzierte Leistung.

In **Bild 11** ist dargestellt, wie sich dieser Leistungseintrag bei einer manuell herbeigeführten Abstandsvariation ändert. Während die Umrichterleistung fast konstant bleibt, zeigt die Werkstückwirkleistung deutliche Einbrüche. Die Werkstückleistung wirkt somit wie eine Lupe, da sinkende Werkstückleistungen sonst zum Teil durch steigende Schwingungsverluste überdeckt werden. Durch diesen „Lupeneffekt“ können auch kleinste Unregelmäßigkeiten und Lageveränderungen des Induktors erkannt und ihrer Position am Umfang des Werkstücks zugeordnet werden.

**Bild 11:** Einfluss einer veränderten Induktorposition auf Umrichter- und im Werkstück umgesetzte Wirkleistung

**Fig. 11:** Influence of inductor position on converter power and net workpiece power



## Berührungslose Induktorlagekorrektur durch Sensoren

Mittels der patentierten, automatischen Abstandsregelung [3] der Härteinduktoren zum Werkstück werden Verzüge des Werkstückes während des Härteablaufes ausgegletet, eine Qualitätskontrolle erfolgt durch die begleitende Wirkleistungsmessung (**Bild 12**). Ergebnis ist eine gleichbleibende Oberflächenhärte und Härtetiefe. Diese sorgen für eine hohe Tragfähigkeit und lange Lebensdauer der Großwälzlager.

## Fazit und Ausblick

Der Fertigungsprozess Härten leistet einen entscheidenden Beitrag, um die anspruchsvollen Bauteil- und Verschleißigenschaften von Drehverbindungen für Windkraftanlagen sicherzustellen.

Dabei kommt dem Verfahren des induktiven Härten ein ganz besonderer Stellenwert zu. Neben dem einfach zu führenden Prozess mit reproduzierbaren Ergebnissen, zeichnet sich das Verfahren insgesamt als energieeffiziente Möglichkeit aus, auch komplexe Bauteile unterschiedlicher Größe wirtschaftlich zu härten.

Mit zunehmender Verbreitung der Windenergie als Lieferant umweltfreundlichen Stromes, vor allem auch offshore, wird auch das Induktionshärten zunehmend an Bedeutung gewinnen und sich neuen Herausforderungen stellen. Dabei geht es einerseits um die Erhöhung

der Produktivität durch optimierte Vorschubtechniken oder reduzierte Nebenzeiten. Andererseits bietet das Verfahren Lösungen zur Härtung komplexerer und kompakter Geometrien bei gleichzeitiger gezielter Einstellung definierter Weichzonen zur Erhöhung der Schwingfestigkeit der Komponenten.

## Literatur

- [1] SMS Elotherm Patent DE 10 2006 003 014 B3, Verfahren zum Härten eines einen geschlossenen Kurvenzug beschreibenden Werkstücks
- [2] SMS Elotherm Patent EP 0 427 879 B1, Vorrichtung und Verfahren zum induktiven Erwärmen von Werkstücken
- [3] SMS Elotherm Patent DE100 34 357 C1, Verfahren und Vorrichtung zum Härten von Flächen an Bauteilen

**Otto Carsen**  
SMS Elotherm GmbH, Remscheid



Tel.: 02191 / 891-328  
o.carsen@sms-elotherm.de

**Dr. Stefan Dappen**  
SMS Elotherm GmbH, Remscheid



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

**Dirk M. Schibisch**  
SMS Elotherm GmbH, Remscheid



Tel.: 02191 / 891-300  
d.schibisch@sms-elotherm.de

# WISSEN für die ZUKUNFT

## Praxishandbuch Thermoprozesstechnik

Das Praxishandbuch Thermoprozesstechnik ist das Standardwerk für die Wärmebehandlungsbranche und somit ein „Must-Have“ für jeden Ingenieur, Techniker und Planer, der sich mit Entwurf und Projektierung oder mit dem Betrieb von Thermoprozessanlagen befasst.

Das Werk gibt einen unter Praxis Gesichtspunkten zusammengefassten und detaillierten Überblick der gesamten Thermoprozesstechnik, der insbesondere für Studierende aller einschlägigen Fachrichtungen sowie für Ingenieure

in der Praxis hilfreich ist. Das Buch ist leserfreundlich aufgebaut und farbige Abbildungen verdeutlichen intensiv die thematischen Zusammenhänge.

Im ersten Band werden die Grundlagen, Prozesse und Verfahren der Thermoprozesstechnik behandelt. Band II. wird sich mit der Anlagen- und Prozesstechnik beschäftigen und voraussichtlich Ende 2010 erscheinen. Das Buch ist auch elektronisch als komplettes E-Book käuflich zu erwerben.

### Inhalt Band I.:

- Thermische Prozesse
- Thermische (Beheizungs-) Verfahren
- Klassifizierung von Industrieöfen
- Werkstofftechnische Grundlagen
- Grundlagen der Wärmeübertragung/ Stoffübertragung
- Verbrennungstechnik
- Elektroprozesstechnik

- Energiebilanzen
- Grundlagen der Strömungstechnik
- Ofenatmosphären
- Werkstoffe im Ofenbau
- Tabellenanhang



**Gleich anfordern – per Post oder per Fax: +49 / 201 / 820 02-34**

Ja, ich bestelle  gegen Rechnung  
 3 Wochen zur Ansicht

\_\_\_ Ex. **Praxishandbuch Thermoprozesstechnik + CD-ROM**  
(Zusatzinfos, Fachzeitschriftenarchiv, Produktbeschreibungen etc.),  
2. Auflage 2009 für € 130,00 zzgl. Versand,  
ISBN 978-3-8027-2947-8

\_\_\_ Ex. **Praxishandbuchthermoproszess-Technik + DVD**  
(alle Inhalte wie bei der CD-ROM + das komplette E-Book)  
2. Auflage 2009 für 180,00 zzgl. Versand,  
ISBN 978-3-8027-2949-2

Die bequeme und sichere Bezahlung per Bankabbuchung wird mit einer Gutschrift von € 3,- auf die erste Rechnung belohnt

**Vulkan Verlag GmbH**  
**Versandbuchhandlung**  
**Postfach 10 39 62**  
**45039 Essen**

**Garantie:** Dieser Auftrag kann innerhalb von 14 Tagen bei der Vulkan Verlag GmbH, Versandbuchhandlung, Postfach 10 39 62, 45039 Essen schriftlich widerrufen werden. Die rechtzeitige Absendung der Mitteilung genügt.  
Für die Auftragsabwicklung und zur Pflege der laufenden Kommunikation werden Ihre persönlichen Daten erfasst und gespeichert. Mit dieser Anforderung erkläre ich mich damit einverstanden, dass ich per Post, Telefon oder E-Mail über neue Produkte und Verlagsangebote informiert werde. Diese Erklärung kann ich jederzeit widerrufen.

Firma/Institution

Vorname/Name des Empfängers

Straße/Postfach, Nr.

Land, PLZ, Ort

Telefon

Telefax

E-Mail

Branche/Tätigkeitsbereich

Bevorzugte Zahlungsweise

Bankabbuchung

Rechnung

Bank, Ort

Bankleitzahl

Kontonummer

Datum, Unterschrift



**CD-ROM + Extrahalt**  
**oder DVD + E-Book**

Herausgeben von Herbert Pfeifer, Bernard Nacke, Franz Beneke  
2. Auflage 2009, ca. 600 Seiten, gebunden, 4C-Druck  
mit CD-ROM, € 130,00, ISBN 978-3-8027-2947-8  
oder mit DVD, € 180,00, ISBN 978-3-8027-2949-2