

Energieeffizienz von Anlagen zum induktiven Randschicht- härten

von **Stefan Schubotz, Hansjürg Stiele**

In vielen Bereichen der Industrie ist aufgrund gestiegener Energiepreise und dem wachsenden Umweltbewusstsein die Energieeffizienz von Maschinen ein äußerst wichtiger Aspekt. Dem Wirkungsgrad von Induktionserwärmungsanlagen, welche Nennleistungen bis in den MW-Bereich generieren, kommt somit eine besondere Bedeutung zu. Aufgrund des gestiegenen Bedarfs nach zuverlässigen Lösungen und den hohen Anforderungen an die Bauteile, erfährt die Induktion als Verfahren zum Randschicht- härten eine hohe Nachfrage.

Energy efficiency of induction heating

Based on increasing prices for energy and growing consciousness for ecology, the energy efficiency of machines has become an important aspect in many sectors of the industry. The significance of the efficiency factor of induction heating systems, which are generating power ratings up to the megawatt-band, has risen up eminently. Due to increasing needs on reliable solutions and high requirements for the components, induction as a tool for surface hardening obtains high demands.

Induktive Erwärmungsanlagen sind elektrisch-mechanische Aufbauten, welche den Zweck haben, elektrisch leitfähige Werkstoffe zu erhitzen. Diese Form der Erwärmung besitzt gegenüber anderen Verfahren viele Vorteile. Es ermöglicht eine sehr gute Reproduzierbarkeit und eine gezielte Härtung bestimmter Bereiche des Werkstückes. Außerdem ist es neben dem konduktiven Erwärmen das einzige direkte Heizverfahren.

Die Effizienz bzw. der Gesamtwirkungsgrad setzt sich bei den direkten Heizverfahren aus der Multiplikation zweier Komponenten, dem Prozesswirkungsgrad und dem elektrischen Wirkungsgrad, zusammen:

$$\eta_{\text{ges}} = \eta_{\text{p}} \cdot \eta_{\text{el}}$$

η_{ges} : Gesamtwirkungsgrad; η_{p} : Prozesswirkungsgrad; η_{el} : Elektrischer Wirkungsgrad;

Der Prozesswirkungsgrad kann als Umwandlung des im Bauteil erzeugten Stromes in Wärme definiert werden und wird häufig auch als thermischer Wirkungsgrad bezeichnet. Im Gegensatz zum elektrischen Wirkungsgrad ist dieser

sehr hoch und beträgt je nach Anwendung zwischen 90 bis 99 % [1]. Die verbliebenen Prozente resultieren größtenteils aus Konvektion und Strahlung [2].

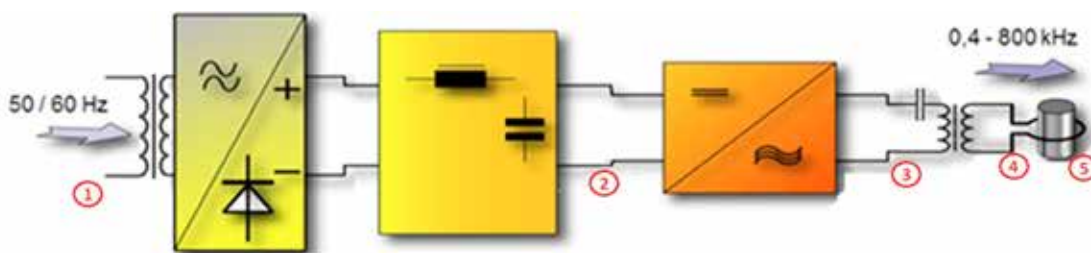
Der elektrische Wirkungsgrad wird mit Hilfe der resultierenden Verluste in den einzelnen stromführenden Komponenten, die für den induktiven Aufheizprozess benötigt werden, errechnet.

Um die Effizienz von induktiven Erwärmungsanlagen zu untersuchen, ist eine genaue Betrachtung der einzelnen elektrischen Komponenten erforderlich. Der schematische Aufbau mit Verlusten ist in **Bild 1** dargestellt.

Demnach besteht die Anlage aus fünf Hauptübertragungselementen:

1. Netztransformator (zur galvanischen Trennung)
2. Umrichter (aufgeteilt in Gleichrichter, Zwischenkreis und Wechselrichter)
3. Kondensatoren zur Blindleistungskompensation (Verschaltung seriell oder parallel zum Induktor)
4. Anpasstransformator bzw. Übertrager (Erhöhung des Ausgangsstromes)
5. Induktor (elektrothermische Energieumwandlung).

Bild 1:
Schematischer
Aufbau mit
Verlusten einer
induktiven Erwärmungsanlage



Umrichtertyp	Anschlusswert in kVA	Wert am Messpunkt in kW					Gesamtwirkungsgrad in %
		①	②	③	④	⑤*	
Transistorumrichter 200 kHz ohne Anpasstrafo (Übertrager)	105	94	89	80	77	64	68
Transistorumrichter 200 kHz mit Anpasstrafo (Übertrager)	105	94	89	80	66	55	59
Thyristorumrichter 10 kHz	105	94	89	80	66	55	59

*Induktorwirkungsgrad: 83%

Nach galvanischer Trennung vom Netz werden die negativen Halbwellen der sinusförmigen Eingangsspannung bzw. des Eingangsstromes mit Hilfe eines gesteuerten oder ungesteuerten Gleichrichters zunächst positiv umgerichtet, geglättet und anschließend wieder in eine Wechselspannung bzw. Wechselstrom mit anderer Frequenz und Amplitude transformiert. Um eine bestimmte Frequenz (Resonanzfrequenz) einzustellen, sind Kondensatoren zur Blindleistungskompensation erforderlich, welche je nach Anwendung entweder parallel oder seriell zum Umrichterausgang geschaltet werden. Da an dieser Stelle bauteilbedingt noch kein ausreichender Strom fließen kann, wird dort ein weiterer Transformator (Übertrager) verschaltet, welcher das Verhältnis aus Strom und Spannung zwischen Primär- und Sekundärseite ändert und auf diese Weise auf der Sekundärseite einen höheren Strom erzeugt.

Im letzten Abschnitt des Aufbaus folgt der sogenannte Induktor, welcher aufgrund des Induktionsgesetzes eine berührungslose Erwärmung des Werkstückes ermöglicht.

Alle Bauteile haben verschiedene Wirkungsgrade und sollen im Folgenden genauer untersucht werden.

NETZTRANSFORMATOR

Transformatoren sind passive, elektrische Bauelemente, die in sehr vielen elektrischen Anlagen vorzufinden sind. Die meisten Transformatoren bestehen aus zwei Wicklungen und ermöglichen neben der Transformation von Wechselspannungen eine galvanische Trennung der Ein- und Ausgangsseite. Besitzt ein Transformator hingegen nur eine Wicklung, so bietet dieser keine galvanische Trennung und wird Spartransformator genannt.

Der Netztransformator befindet sich unmittelbar am Netz und besitzt auf der Eingangs- und auf der Ausgangsseite häufig die gleichen Windungszahlen. In wenigen Anlagen wird jedoch die Eingangsspannung sekundärseitig auf ein anderes Niveau transformiert.

Dieser Transformator bedient Sicherheitsaspekte, indem er für eine galvanische Abkopplung der Induktionsanlage vom Netz sorgt und auf diese Weise hochfrequente Rückkopplungen des Umrichters verhindert, die bei einem Fehlerfall denkbar wären. Mit einem Wirkungsgrad von etwa 98 % entstehen dort normalerweise nur geringe Verluste [1].

UMRICHTER

Mit Hilfe des Umrichters wird die eingangsseitige Wechselspannung bzw. der Wechselstrom zunächst gleichgerichtet, geglättet und anschließend in eine andere Wechselspannung bzw. einen Wechselstrom beliebiger Amplitude und Frequenz umgewandelt. Der Wirkungsgrad von Umrichtern mit modernen Halbleitern variiert je nach Leistung und Frequenz und liegt für Anwendungen in der Induktionserwärmung bei ca. 90 % [3]. Die Verluste im Gleichrichter und im Wechselrichter betragen jeweils zwischen 3 bis 5 %. Im Zwischenkreis kann eine Verlustleistung von etwa 1,5 % angenommen werden [3]. In Zukunft sind für Umrichter noch höhere Wirkungsgrade zu erwarten.

KONDENSATOREN

Am Ausgang des Umrichters sind parallel- oder in Serie geschaltete Kondensatoren zur Blindleistungskompensation installiert. Hierfür werden in der Regel Folienkondensatoren aufgrund der hohen Stromtragfähigkeit bei gleich-

zeitig geringem Innenwiderstand verwendet [4]. Daher liegen z.B. die Verluste bei Serienschwingkreisumrichtern unter 1 % [5].

ANPASSTRANSFORMATOR (ÜBERTRAGER)

Ein weiterer Transformator, der sogenannte Anpasstransformator (Übertrager), liegt zwischen den Blindleistungskondensatoren und dem Induktor. Dieser ermöglicht durch sein unterschiedliches Windungsverhältnis einen sehr hohen Strom. Neben der induktiven Blindleistung werden hier im Vergleich zum Netztransformator deutlich höhere Verluste von etwa 10 % verursacht. Damit beträgt der Wirkungsgrad ca. 90 %, wodurch eine ständige Kühlung dieses Transformators notwendig wird.

INDUKTOR

Der Induktor ist an der Sekundärseite des Anpasstransformators angeschlossen und bildet damit die letzte Station des Aufbaus ab. Die Verbindung zwischen der Induktionsanlage und dem zu erwärmenden Werkstück wird an dieser Stelle realisiert. Aufgrund der hohen Ströme, die im Induktor fließen und der Übertragungsverluste des berührungslosen Kontaktes zwischen Induktor und Werkstück, ist hier der Wirkungsgrad am geringsten und damit eine Betrachtung besonders wichtig. Der Wirkungsgrad ist erheblich von der Bauform des Induktors abhängig, welche im Folgenden genauer untersucht wird.

INDUKTORTYPEN

Je nach Form des Werkstückes ist ein entsprechender Induktor zu verwenden. Somit gibt es beliebig viele denkbare Bauformen von Induktoren. Die vier wichtigsten Grundtypen mit den dazugehörigen Wirkungsgraden sind in **Bild 2** dargestellt.

Ein sehr häufig benutzter Induktor ist der sogenannte Innenfeld-Induktor. Dieser ist meist kreisförmig und eignet sich insbesondere für rotationssymmetrische Werkstücke, die im Vorschub induktiv erwärmt werden. Mit einem Wirkungsgrad von bis zu 90 % ist dieser auch am effizientesten. Das Gegenstück dazu bildet der Außenfeldinduktor, welcher die Innenseite von zylinderförmigen, hohlen Objekten erhitzt und dessen Wirkungsgrad zwischen 30 bis 50 % liegt.

Beim Gesamtflächenhärten von Werkstücken wird das sogenannte Single Shot-Verfahren (Gesamtflächenverfahren) angewendet, d.h. das gesamte Werkstück befindet sich im Induktor und wird bei Stillstand des Induktors und Rotation des Werkstückes induktiv erhitzt. Der Wirkungsgrad dieses Aufbaus liegt bei 40 bis 50 %.

Den schlechtesten Wirkungsgrad besitzen „Haarnadel-induktoren“, welche häufig zum Erwärmen von planen Werkstücken eingesetzt werden und einen Wirkungsgrad von ca. 20 bis 40 % besitzen.

Eine gute Möglichkeit, um den thermischen Wirkungsgrad von Induktoren zu verbessern, kann mit Hilfe von Feldführungselementen, sogenannten Konzentratoren, realisiert werden. Mit diesen wird der magnetische Fluss derart beeinflusst, dass dieser auf das erwärmte Werkstück konzentriert wird. Die Wahl des Konzentratormaterials ist abhängig von der Frequenz und der Konstruktion. Hierfür werden laminierte Weicheisenbleche oder auch magnetodielektrische Materialien benutzt.

EINFLUSS DES WERKSTOFFS

Elektromagnetische Induktion ist nur unter Verwendung von Wechselströmen möglich und verursacht neben Ummagnetisierungsverlusten vor allem Wirbelstromverluste, die eine Aufheizung des Werkstückes hervorrufen. Die

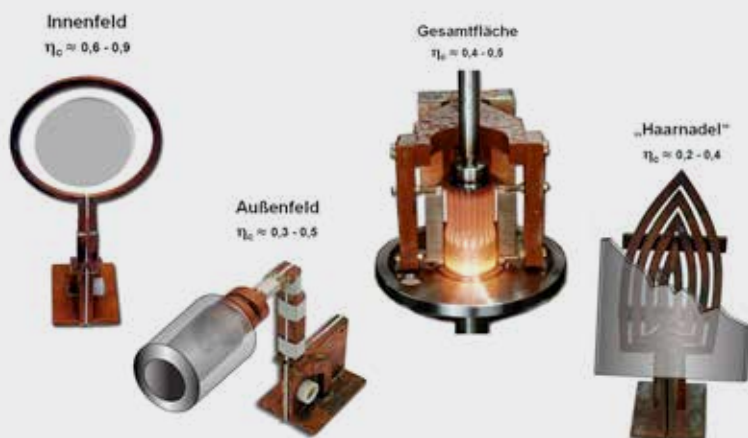


Bild 2: Verschiedene Induktoren mit dazugehörigen Wirkungsgraden

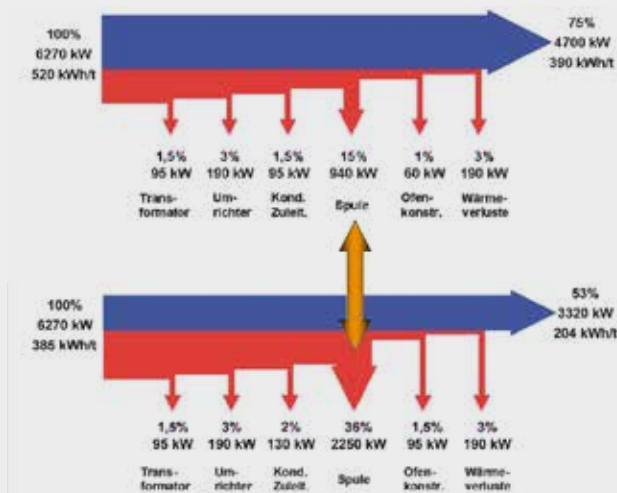


Bild 3: Wirkungsgrad beim induktiven Erwärmen von Gusseisen und Kupfer [1]

Verluste im Werkstoff berechnen sich über den Ausdruck $P = I^2 R$ (R = Innenwiderstand des Werkstückes, I = induzierter Strom im Werkstück, P = umgesetzte Leistung im Werkstück). Der Innenwiderstand des zu erwärmenden Objektes hat damit maßgeblichen Einfluss auf die Verlustleistung des induktiven Erwärmungsprozesses.

Um dies zu verdeutlichen, sind zwei Diagramme (**Bild 3**) über die Verluste von Induktionsanlagen gegenübergestellt, wobei die Unterschiede im zu erwärmenden Werkstoff und der zugeführten elektrischen Energie liegen.

Anhand der Schaubilder ist zu erkennen, dass die Verluste, die beim induktiven Erwärmen eines Werkstückes aus Kupfer entstehen, über 20 % höher sind als bei der induktiven Erwärmung von Gusseisen. Dies ist auf den höheren Innenwiderstand von Eisen zurückzuführen. Der spezifische Widerstand von Kupfer beträgt etwa $0,17 \cdot 10^{-7} \Omega m$, welcher gegenüber dem spezifischen Widerstand von Gusseisen mit $1,25 \cdot 10^{-7} \Omega m$ über 85 % geringer ist.

In den vorigen Abschnitten sind die verschiedenen Wirkungsgrade der einzelnen Hauptübertragungskomponenten einer Anlage zur induktiven Erwärmung angegeben worden. Bei einer Härteanwendung (Material: Eisen; Induktor: Innenfeldinduktor) ergibt sich somit z.B. folgender Wirkungsgrad:

$$\eta_{ges} = \eta_{Ntr} \cdot \eta_{Um} \cdot \eta_C \cdot \eta_{Atr} \cdot \eta_{In} = 98\% \cdot 90\% \cdot 99\% \cdot 90\% \cdot 80\% = 63\%$$

- η_{ges} : Gesamtwirkungsgrad
- η_{Ntr} : Wirkungsgrad des Netztransformators
- η_{Um} : Wirkungsgrad des Umrichters
- η_C : Wirkungsgrad der Blindleistungskondensatoren
- η_{Atr} : Wirkungsgrad des Anpasstransformators
- η_{In} : Wirkungsgrad des Innenfeldinduktors

Zu berücksichtigen ist, dass die aufgeführten Betrachtungen nur die Hauptübertragungskomponenten einer induktiven Härteanlage beinhalten. Um den (sicherlich schwierig zu ermittelnden) Gesamtwirkungsgrad einer induktiven Härteanlage zu bestimmen, sind weitere Betrachtungen hinsichtlich der Wirkungsgrade für folgende Komponenten durchzuführen:

- Abschreckmittelanlage (Pumpen, Industriekühler etc.)
 - Rückkühlanlage elektrischer Komponenten (Pumpen, Industriekühler etc.)
 - Führungsmaschine (Steuerung, Motoren etc.).
- Hierbei stellt sich allerdings die grundsätzliche Frage nach den Systemgrenzen bzw. deren Festlegung.

FAZIT

Die Induktion als nutzbares Phänomen ist eines der wichtigsten Verfahren zur Erwärmung von elektrisch leitfähigen Materialien. Da es sich hierbei um ein direktes Erwärmungsverfahren handelt, ist der Wirkungsgrad bei Härteapplikationen hoch. Wie aufgezeigt, entstehen die höchsten Verluste

im Induktor, wobei diese auch in Zukunft nicht wesentlich verringert werden können, da der Induktor immer an das Werkstück und an das Verfahren angepasst werden muss.

Der hohe Wirkungsgrad der induktiven Erwärmung, im Vergleich zu anderen Verfahren, gilt jedoch nur bei Vernachlässigung der Verlustleistung, die bei der Stromerzeugung entsteht. Nach [6] beträgt der Gesamtwirkungsgrad vom Primärenergieeinsatz eines durchschnittlichen Kraftwerks bis zur Steckdose 33 %.

Abschließend bleibt in der Praxis festzustellen, dass sich die Wahl des Erwärmungsverfahrens weniger am Wirkungsgrad, sondern primär an der Anwendung orientiert, so dass alle Verfahren, je nach Einsatz, entsprechend geeignet sind. Somit gewinnt die Energieeffizienz zwar immer mehr an Bedeutung, allerdings wird in der Praxis häufig das Verfahren gewählt werden, welches den Zweck am besten erfüllt.

LITERATUR

- [1] Pfeifer, H., Nacke, B., Beneke, F.: *Praxishandbuch Thermoprozesstechnik*, Essen, Vulkan-Verlag, 2010.
- [2] Zedler, T.: *Dissertation*, Sierke Verlag, 2010.
- [3] Storz, G.: *Interviewee*, Interview, 2012
- [4] Schubotz, S.: *Diplomarbeit: Untersuchung von Offline- und Onlineverfahren zur Detektion des Alterungszustandes von Kondensatoren im Spannungszwischenkreis von Umrichtern*, Kiel, 2011.
- [5] Markegaard, L.: *Interviewee*, Interview, 2012.
- [6] Bonin, J.: *Handbuch Wärmepumpen: Planung und Projektierung*, Berlin, Beuth, 2009.

AUTOREN



Dipl.-Wirtsch.-Ing. **Stefan Schubotz**
 EFD Induction GmbH
 Freiburg
 Tel.: 0761/8851-374
 Email: szs@de.efdgroun.net



Dr. **Hansjürg Stiele**
 EFD Induction GmbH
 Freiburg
 Tel.: 0761/ 8851-296
 sth@de.efdgroun.net