

Qualitätsüberwachung beim Induktionshärten

von **Michael Dawidowicz, Stefan Dappen**

Das Induktivhärten ist für seine gute Reproduzierbarkeit bekannt. Trotzdem kann auch hier die Qualität durch verschiedene Störgrößen beeinflusst werden. Neben der Geometrie, Legierung, Wärmebehandlungs- und Bearbeitungsvorgeschichte des Werkstücks sind dies vor allem die Wärmebehandlungsparameter beim Härten. Im Folgenden wird gezeigt, wie die Induktoren und der Prozess überwacht werden müssen, um eine reproduzierbare Erwärmung sicherzustellen und welche Faktoren deren Qualität beeinflussen. Die Kühl- und Abschreckmedien, deren Eigenschaften in engen Grenzen automatisiert überwacht und stabilisiert werden können, sorgen für eine gute Induktorstandzeit und gleichbleibende Abschreckeigenschaften.

Quality control in induction hardening

Induction hardening is well known for its good reproducibility. Nevertheless, the quality can also be influenced by several disturbances. In addition to the geometry, the chemistry and the heat treatment history of the workpiece, the heat treatment parameters during heating and quenching have a major impact. We will show how the inductors and the heating process must be monitored in order to ensure reproducible heating and which factors influence the heating quality. Cooling and quenching media, whose properties can be automatically monitored and stabilized within narrow bounds, ensure good inductor service life and constant quenching properties.

Die Qualität eines Produktes ist ein Merkmal, welches durch die Erfüllung von bestehenden Anforderungen beschrieben werden kann. Nach der DIN EN ISO 9000:2015-11 ist die Qualität als „Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale eines Objekts Anforderungen erfüllt“, definiert.

Die Anforderungen beim Induktionshärten sind in der auf das Werkstück abgestimmten Härtespezifikation festgelegt. Hierbei spielen vor allem die Härtezonengeometrie, die einzustellende Härte und die Gefügestruktur eine wesentliche Rolle. Diese Eigenschaften lassen sich im laufenden Betrieb meist nicht direkt messen, insbesondere nicht mit einer detaillierten örtlichen Auflösung entlang der gehärteten Werkstückoberfläche. Die Produktqualität wird somit über die Prozessstabilität eines einmal eingestellten und verifizierten Prozesses erreicht, der auf einem zeitlich definierten Ablauf von Erwärmen und Abschrecken beruht. Die Verarbeitung und Visualisierung erfolgt auf einem Industrie-PC mit dem dafür eigens entwickelten System EloProcess. Beim Erwärmen bestimmt der Induktor als

Werkzeug ganz wesentlich mit seiner Geometrie die Härtezone. Das Kupfermaterial, wie auch die Konzentratobleche sind hohen thermischen Wechselbelastungen ausgesetzt. Bereits kleine Veränderungen, wie eine veränderte Lage des Heizleiters zum Werkstück, können einen erheblichen Einfluss auf die Produktqualität haben.

Beim Abschrecken ist interessanterweise die Brause nur mittelbar bestimmend für die Prozesssicherheit. Viel entscheidender sind konstante Eigenschaften des Abschreckmediums. Der gegenüber der Umwelt offene Wasserkreis ist anfällig für den Eintrag von Öl und Spänen und neigt zur Verkeimung. Erst als Folge davon setzt sich die Brause zu, sodass ein erhöhter Wartungsaufwand auftritt. Nicht zu vernachlässigen sind die erheblichen Wasserverluste durch Verdampfung und Absaugung, die zu schwankenden Abschreckeigenschaften führen. Mit EloFresh, dem Wasseranalyse-System aus dem Hause SMS Elotherm, können die eingesetzten Medien kontinuierlich überprüft und ihre Eigenschaften in engen Grenzen stabilisiert werden.

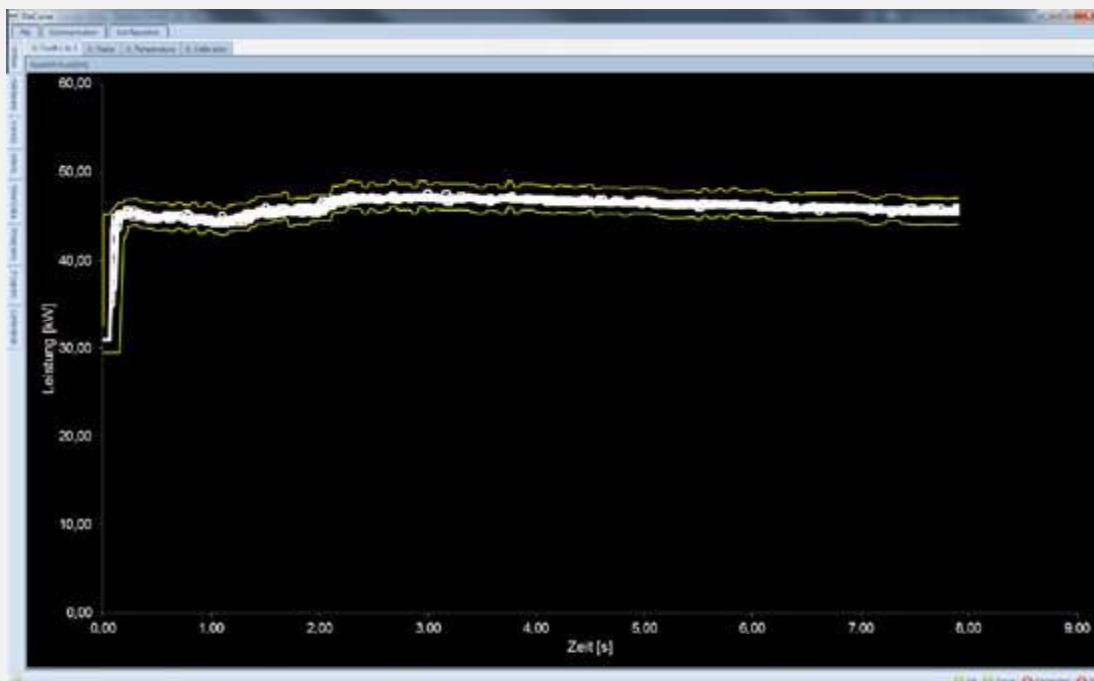


Bild 1: Maschinenfähigkeitsuntersuchung: gelb dargestellt das Toleranzband; weiß dargestellt überlagert die 50 Leistungskurven der MFU

ÜBERWACHUNG DER ERWÄRMUNG MIT ELOPROCESS

In **Bild 1** sind die Ergebnisse einer Maschinenfähigkeitsuntersuchung gezeigt, aus der die gute Reproduzierbarkeit des Induktionshärtens innerhalb des engen Toleranzbandes von $\pm 1,5$ kW (gelber Bereich) ersichtlich wird. Im Folgenden werden die Auswirkungen verschiedener Fehlersituationen analysiert, die in der Realität auftreten können.

Die Überwachung des Erwärmungsprozesses erfolgt in zwei Stufen, da ansonsten die Unterscheidung zwischen Fehlern, die alleine den Induktor betreffen und solchen, die die

relative Lage von Induktor und Werkstück betreffen, nicht möglich ist.

Im ersten Schritt, der Induktorprüfung, wird jeder Induktor einzeln ohne Werkstück zu Beginn eines Fertigungsloses durchgemessen. Die ermittelte Leistung ohne Werkstück ist deshalb die Summe aller Verluste in der gesamten Maschine, wobei der Induktor hierzu den überwiegenden Anteil von 80–90 % beiträgt. Diese Verluste hängen nur von der Frequenz und dem Strom ab und lassen sich durch einen frequenzbewerteten Ersatzwiderstand darstellen.

Ohne ein Teil zu härten lassen sich bereits Veränderungen am Induktor erkennen. **Bild 2** zeigt z. B. die Veränderung der messbaren Induktoreigenschaften selbst bei Reduzierung einer kleinen Menge der Konzentradorbleche, mit denen Induktoren in vielen Fällen bestückt sind, um das magnetische Feld auf die zu härtende Fläche zu konzentrieren. Die Blechpakete werden auf den Heizleiter gesteckt, verklebt und bei Bedarf zusätzlich fixiert. Sollten sich Blechpakete dennoch lösen, wird die magnetische Feldführung verändert und der Induktor in seiner Wirkleistung reduziert.

In einem zweiten Schritt, der Online-Qualitätsüberwachung, wird der Erwärmungsvorgang mitgeschrieben. Dabei wird zur Laufzeit neben der vom Umrichter abgegebenen Leistung auch die Verlustleistung in der Maschine aus dem Ersatzwiderstand ermittelt. Als Nebenprodukt ergibt sich als Differenz zwischen beiden Leistungen die in das Werkstück induzierte Leistung.

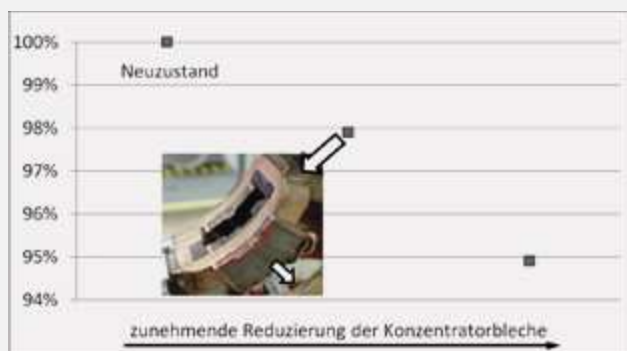


Bild 2: Änderung der Induktorwirkung bei teilweiser Reduzierung der Konzentradorbleche

Unterschiedliche Fehleranalysen beim Induktionshärten

Für eine stabile Produktqualität ist eine genaue Prozessanalyse notwendig, um qualitätseinschränkende Faktoren und den dazugehörigen Einflussbereich beschreiben zu können. Anhand einer Kurbelwellenhärtung wurden im Entwicklungslabor mögliche Fehlerursachen simuliert und bewertet.

Das Werkstück wird mit den Einstelldaten aus der Prozessentwicklung gehärtet und die elektrischen Daten im Zeitverlauf gemessen. Diese sogenannte Gutkurve wird zu einem Toleranzfenster (in den folgenden Bildern gelb dargestellt) aufgezogen, dessen Toleranzbreite zuvor über Grenzmuster ermittelt wurde. Sollte die Messkurve der aktuellen Härtung im Produktionsbetrieb den Toleranzbereich verlassen, wird der Härtevorgang abgebrochen und die Maschine reagiert nach einem zuvor definierten Schema (Abschrecken, Nicht-Abschrecken, Nacharbeit anbieten). Für diese Veröffentlichung wird diese Automatik abgeschaltet, um die Unterschiede der provozierten Fehler darstellen zu können.

Fehlende Öllochbohrungen

Die Induktionshärteanlage muss nicht ausschließlich für das Härten und Anlassen von Werkstücken eingesetzt werden, sondern kann auch als Eingangskontrolle von vorgelagerten Prozessen, wie hier dem Bohren der Öllöcher, dienen. In **Bild 3** werden die Leistungskurven für ein Hauptlager mit Ölloch (rot) und ohne Ölloch (weiß) dargestellt und ein in gleichen zeitlichen Abständen wiederkehrender Effekt beobachtet. Das Ölloch passiert die Induktor-Heizleiterschleife und wird aufgrund des erhöhten Koppelspaltes als Leistungsabfall ersichtlich. Damit lassen sich Fertigungsfehler frühzeitig erkennen.

Nacharbeit

Der Begriff „Nacharbeit“ umfasst die Situationen, in denen Prozessstörungen nicht zwangsweise zu einem Ausschussteil führen müssen, sondern durch einen wiederholten Prozess als Gutteil weiterlaufen können – z. B. stark verschmutzte Werkstücke, die zu einem Kontakt zwischen Induktor und Werkstück führen und somit einen Prozessabbruch zum Schutz des Induktors einleiten. Situationen wie Doppelhärtungen einer Lagerstelle oder Härtung einer bereits aufgewärmten Welle müssen in diesem Fall besonders kritisch bewertet und einer 100 % Rissprüfung unterzogen werden. In **Bild 4** wird eine Doppelhärtung dargestellt, welche sich mit einer lokal steileren Kurve bemerkbar macht. Da die Permeabilität für ein martensitisches Gefüge kleiner als für ein ferritisch perlitisches Gefüge ist [1], kann insbesondere um die Curie-Temperatur herum eine Veränderung in der Kurve festgestellt werden.

Bei einer vorgewärmten Welle, welche nicht gehärtet, sondern lediglich aufgewärmt wurde, wird die Curie-Temperatur schneller erreicht, wodurch man einen zeitlich früheren Leistungsanstieg beobachten kann (**Bild 5**). Das erreichte Maximum entspricht allerdings in etwa dem Wert der Gutkurve.

Kleinerer Koppelabstand bei Gleitschuhverschleiß

Die Induktoren für Kurbelwellen sind werkstückberührende Teile, die mit sechs Auflagepunkten auf der Welle geführt werden. Die Auflage wird mithilfe von Hartmetall- oder Keramik-Gleitschuhen realisiert, die einen konstanten Koppelspalt zum Werkstück garantieren sollen. Im Verlauf des Induktorlebens verschleißt der Gleitschuh, sodass sich der Koppelspalt reduziert. Der Luftspalt zwischen Induktor und Werkstück ist

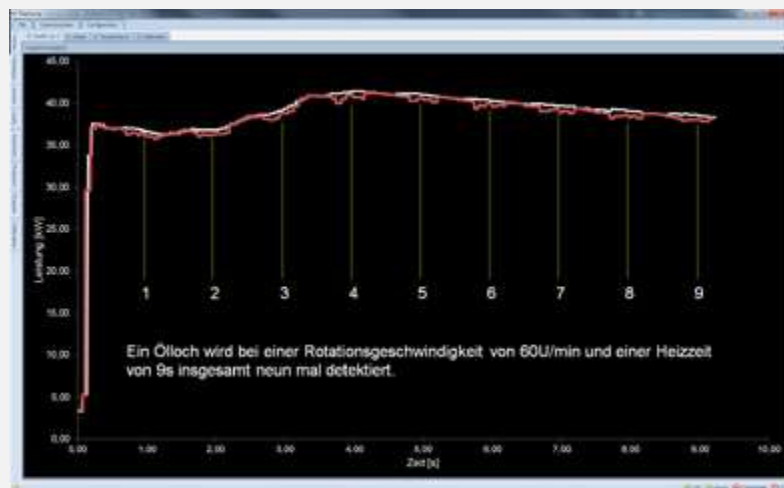


Bild 3: Erkennung von Öllochbohrungen: weiß dargestellt die Leistungskurve eines Lagers ohne Ölloch; in rot die Leistungskurve mit Ölloch

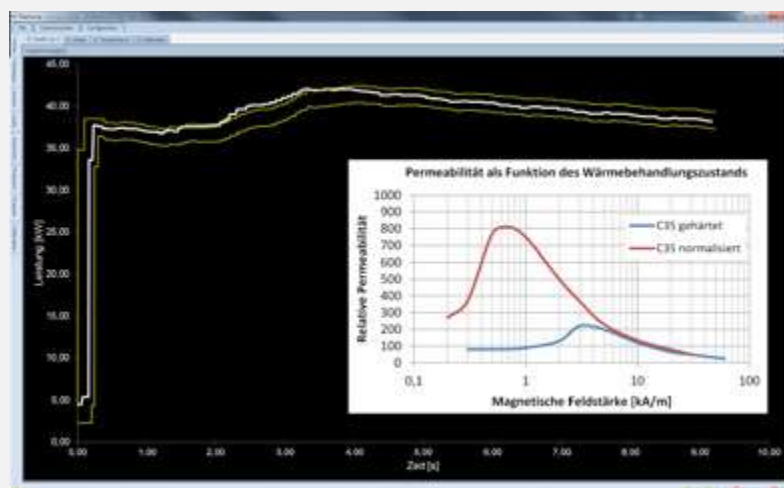


Bild 4: Härtung eines bereits gehärteten Kurbelwellenlagerstung

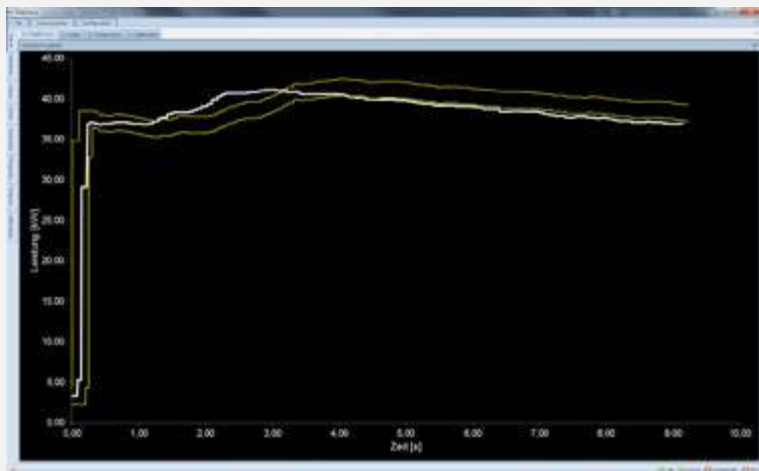


Bild 5: Härtung eines bereits vorgewärmten Kurbelwellenlagers

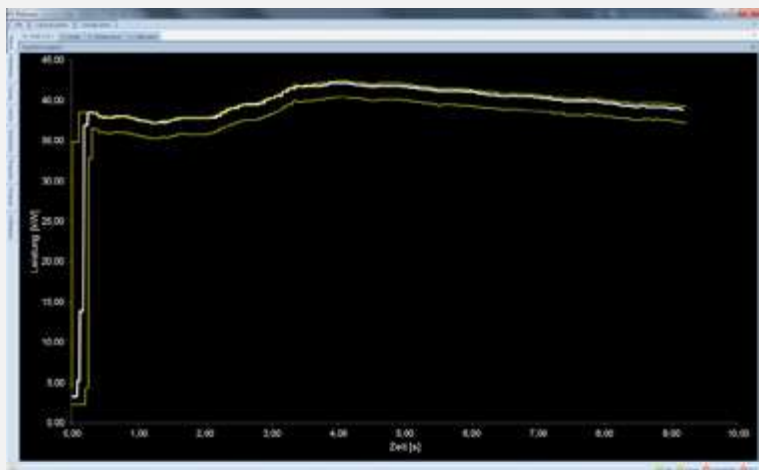


Bild 6: Härtung eines Kurbelwellenlagers bei reduziertem Koppelspalt

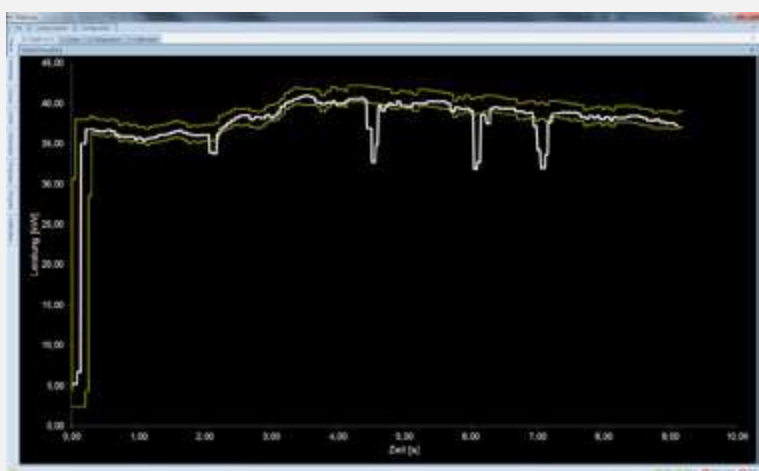


Bild 7: Härtung eines Kurbelwellenlagers bei zu geringen Auflagekräften

das Übertragungsmedium des elektromagnetischen Feldes und hat einen erheblichen Einfluss auf die Härtezone und somit auf die geforderte Produktqualität. Je kleiner der Spalt, desto besser die Induktionsübertragung in das Werkstück. In **Bild 6** sieht man das Messsignal, dass für einen bereits fortgeschrittenen Verschleiß um 0,2 mm aufgenommen wurde. Die angehobene Leistungskurve entspricht auch quantitativ den Ergebnissen, die mithilfe einer numerischen Rechnung in ANSYS gewonnen werden konnten.

Induktorposition und -klemmung

Bei der Kurbelwellenhärtung laufen die Pleuellagerinduktoren auf einem Kreis mit dem Durchmesser des doppelten Kurbelhubs. Die dabei auftretenden Fliehkräfte müssen durch eine erhöhte Auflagekraft kompensiert werden. Wenn diese Voreinstellungen verändert und soweit reduziert werden, dass die Induktoren während der Härtung abheben, dann ist die Produktqualität stark gefährdet. Das gleiche Fehlerbild kann bei einer minimalen Geometrieänderung des Kurbelwellenlagers entstehen und stellt sich wie in **Bild 7** dar. Es werden eindeutige Signalausschläge registriert, wenn der Induktor abhebt und das Werkstück nicht vollständig umfasst.

Weitere typische Fehler, die ebenfalls erkannt werden, sind schlechter Induktorkontakt, reduzierte Kühlung im Induktor bzw. Transformator und Späne auf dem Werkstück.

ELOFRESH

Ein oft unterschätztes Thema beim Induktivhärten ist die Kühlung. Da ein gehärtetes Werkstück meist kalt in die Maschine einläuft und auch kalt entnommen wird, wird die induzierte Wärmeenergie fast vollständig über die Rückkühlung abgeführt. Beiden Kühlkreisen (Elektrokühlung und Abschreckmittelkühlung) kommt dabei eine gleich hohe Bedeutung im Hinblick auf Induktorstandzeit, Produktionssicherheit und Produktqualität zu. Aus diesem Grund gibt es mit EloFresh für beide Medienkreise ein zugeschnittenes System, das autark von der Maschine betrieben werden kann und somit auch für Nachrüstungen geeignet ist. Labortechnische Wasseranalysen können damit erheblich reduziert werden. Des Weiteren erhält man einen schnellen Überblick über den Wasserverbrauch und kann somit auf Leckagen im System schließen, die sonst nicht bemerkt werden können.

Elektrokühlung

Das Wasser für die Elektrokühlung muss gewisse Anforderungen erfüllen. Chloride (<150 mg/l) und Sulfate (<50 mg/l) sind wegen ihrer korrosiven Wirkung eingeschränkt. Gelöste Salze können zu Ablagerungen an den Innenseiten der wassergekühlten Profile führen, die den Wärmeübergang reduzieren. Weiterhin sollte der pH-Wert (pH 7–8,5) beachtet werden, der im Zusammenhang mit Keimen im Wasser ein Indikator für Kühlprobleme ist. In vielen Fäl-

len ist deshalb die Nutzung von vollentsalztem (VE) Wasser wegen seiner gleichbleibenden Eingangsqualität zu empfehlen. Reines VE-Wasser ist allerdings nur mit einem Inhibitor für den Einsatz als Kühlmittel geeignet. Da das Wasser der Elektrokühlung in einem geschlossenen Kreis umgewälzt wird, ist es weniger Umwelteinflüssen ausgesetzt. Trotzdem neigt es zu Veränderungen (z. B. Keimwachstum und Ablagerung des Inhibitors an den Wänden des Kühlsystems) und muss daher laufend überwacht und seine Eigenschaften müssen eingestellt werden.

Eine schlechte Wasserqualität ist oft die Ursache für eine geringe Induktorstandzeit und für Korrosionsprobleme im Wasserkreis, speziell auch am Kupfer.

Bei EloFresh werden die wesentlichen Eigenschaften des Elektrokühlmittels gemessen und bei Bedarf neu eingestellt (**Bild 8**). Der chemische Abtrag von Messing und Kupfer wird ebenfalls über eine Korrosionsmessstrecke überwacht.

Abschreckmittelkühlung

Der Abschreckmittelkühlkreis unterscheidet sich deutlich vom Elektrokühlkreis. Die Werkstücke und die große freie Oberfläche zur Umgebung haben einen dauernden Eintrag von Fremdstoffen zur Folge. Schwebstoffe und Späne lassen sich zwar über Filter und Magnetabscheider aus dem Medium wieder entfernen, eine vorherige Reinigung der Werkstücke führt aber zu stabileren Prozessen und einer deutlich reduzierten Induktorverkrustung.

Der erhebliche Austrag insbesondere des Wassers, in geringerem Maße auch des Polymers über die benetzte Werkstückoberfläche erfordern ein ständiges Nachspeisen, wobei die eingestellte Konzentration eingehalten werden muss.

Durch die laufende Konzentrationsmessung und die automatische Nachspeisung übernimmt EloFresh diese Aufgabe (**Bild 9**). Handmessungen zur Konzentrationsbestimmung können entfallen. Die problematische Verkeimung wird über eine Bioziddosierung automatisiert vermieden.

QUALITÄTSERHALTUNG DURCH PROFESSIONELLE WARTUNG

Bisher wurde der Schwerpunkt auf die Prozess- und Medienüberwachung gelegt, die einen großen Einfluss auf die Produktqualität und Produktivität der Maschine hat. Eine weitere und nicht zu vernachlässigende Größe ist die Wartung der eingesetzten Induktoren. Wie bereits in dem ersten Teil beschrieben, tragen verschleißartige Änderungen der Induktoren zu einem nicht erwünschten Härteergebnis bei. Die Anforderungen an das Werkzeug sind dabei sehr hoch, da es in einem Nassraum thermischen Wechselbelastungen unterliegt und dabei eine lange Standzeit von mehreren 10.000 Härtezyklen aufweisen muss. Für eine bedienerfreundliche Wartung werden im Hause SMS Elotherm RFID-Chips eingesetzt, die mit ihren

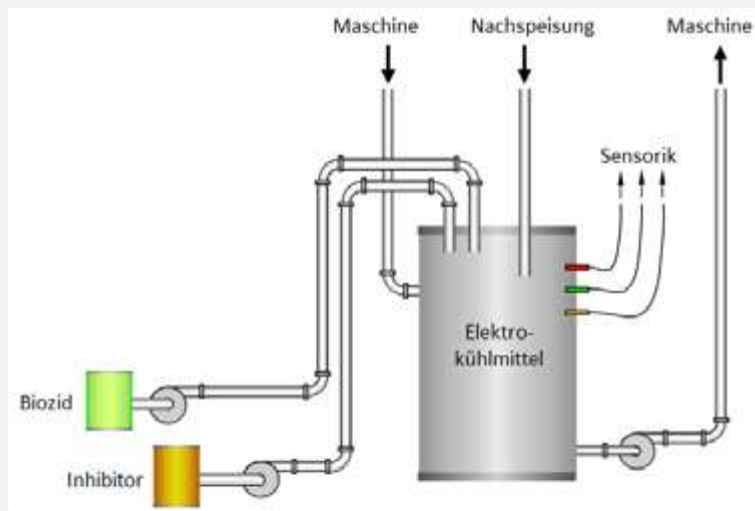


Bild 8: Schema EloFresh für Elektrokühlung

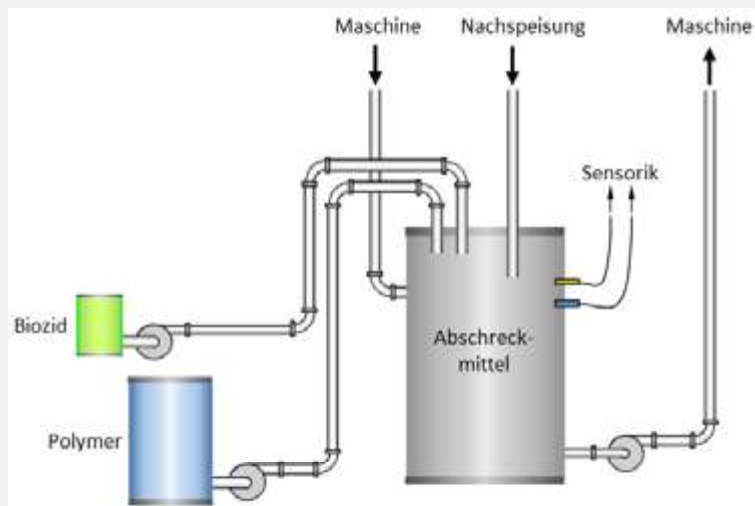


Bild 9: Schema EloFresh für Abschreckmittelkühlung

Informationsinhalten diverse Vorteile mit sich führen und die Voraussetzung für das System EloMind sind.

Zu Beginn einer fachgerechten Wartung erfolgt eine Reinigung der Induktoren, mit der die Rückstände an den Seitenblechen und dem Heizleiter entfernt werden. Mit einem speziell entwickelten Prüftisch (**Bild 10**) werden die Induktorwartungen nicht mehr willkürlich bearbeitet, sondern programmunterstützt geführt und dokumentiert. Dabei werden die Daten eines in der Prüfstation eingespannten Induktors in die Wartungssoftware übertragen.

Alle geometrischen Prüfmaße sind im Chip hinterlegt und werden Schritt für Schritt abgefragt. Der Bediener wird durch bildliche Darstellungen geführt und bekommt einen schnellen Überblick über den Stand der einzelnen Induktorsätze. Mithilfe von zwei elektronischen Drucksensoren und einem Durchflusssensor wird die Kühlmenge gemessen



Bild 10: Induktorprüftisch mit Durchflussmengenprüfung und Rechneranbindung, o.r.: Auszug der Handy-App

und in das Wartungsprotokoll geschrieben. Die erzeugten Daten werden auf den Induktorchip zurückgeschrieben und können ebenfalls an das Firmennetz gesendet und in Form einer Werkzeugdatenbank verwaltet werden.

Die Induktorchips erlauben zusätzlich Nahfeldkommunikation (NFC) und können mittels Handy-App direkt ausgelesen werden. Damit ist es bereits bei der Entnahme des Induktors aus dem Induktorschrank möglich, den Status des Induktors zu prüfen.

Jeder Induktor weist im Verlauf seiner Lebenszeit Alterungserscheinungen auf, die zu einer Parameteranpassung führen. Dabei werden oftmals nicht die Prozesszeiten, sondern aus Taktzeitgründen vielmehr die Prozessleistungen angepasst. Diese Offset-Werte sind ebenfalls auf dem RFID-Chip hinterlegt und werden in der Induktionshärtemaschine abgefragt und angewendet.

Die Lese- und Schreibfunktionalität erlaubt es ebenfalls, die Häufigkeitsverteilung der seit der letzten Wartung gefahrenen Leistungsdaten anzuzeigen. Mit dem neuen Wartungskonzept wird eine große Transparenz bei der Nutzung der Induktoren erreicht.

FAZIT

Induktoren und die Kühlmedien sind die Werkzeuge beim Induktivhärten. Ihre Wartung und Überwachung ist die Grundlage der Qualität. Im Mittelpunkt hierbei stehen detaillierte Prozessanalysen. Präventive Systeme wie Elo-

Fresh und softwaregeführte Wartungen wie EloMind verringern das Risiko deutlich, dass Toleranzgrenzen verletzt werden. Qualität und Produktivität beim Induktivhärten lassen sich durch diese Anlagentechnik, der EloConnect von SMS Elotherm auf hohem Niveau stabilisieren.

LITERATUR

- [1] Hünicke, U.-D.; Möller, S.: Auswertung der statischen Magnetisierungskurve zur Kontrolle von Gefüge- und Behandlungszuständen bei Stählen. ZFP in Anwendung, Entwicklung und Forschung, 2003



AUTOREN

M.Sc. **Michael Dawidowicz**
SMS Elotherm GmbH
Remscheid
Tel.: 02191 / 891-215
m.dawidowicz@sms-elotherm.com



Dr.-Ing. **Stefan Dappen**
SMS Elotherm GmbH
Remscheid
Tel.: 02191 / 891-204
s.dappen@sms-elotherm.com