

# Neueste Entwicklungen zur Steigerung der Energieeffizienz bei Induktionsanlagen

von **Jochen Gies, Markus Langejürgen**

Unter dem ständig steigenden Kostendruck in der Schmiedeindustrie sind die Hersteller von Schmiedelinien aufgefordert, innovative Konzepte zu entwickeln, um die vorhandenen Ressourcen zu schonen. Diese Konzepte müssen dem Betreiber der Induktionsanlagen die Möglichkeit bieten, der Forderung vieler OEMs hinsichtlich der Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen nachzukommen. Die Steigerung der Energieeffizienz von Induktionsanlagen erhält mit dieser Forderung eine bedeutende Rolle und stellt für die konsequente Weiterentwicklung der induktiven Erwärmungsanlagen einen wichtigen Schritt dar.

## Recent developments to increase the energy efficiency of induction systems

Given the constantly increasing cost pressure in the forging industry, the manufacturers of forging lines are also asked to develop innovative concepts to conserve existing resources. These concepts must offer the opportunity to meet the demands of many OEMs regarding the reduction of CO<sub>2</sub> emissions. Increasing the energy efficiency of induction systems therefore plays a major role and represents an important step for the consistent further development of inductive heating systems.

In Deutschland werden jährlich ca. 2,3 Mio. t Schmiedeteile in der Warmumformung produziert. Für die Erwärmung des Schmiedematerials sind rund 1.000 GWh/a erforderlich, was selbst bei guten Energiekosten in Höhe von 0,10 €/kWh eine Summe von 100 Mio. €/a bedeutet. Die vorliegenden Zahlen machen deutlich, dass die Induktionsanlagenbauer hier besonders gefordert sind, intelligente Konzepte für energieeffiziente, induktive Erwärmungsanlagen zu entwickeln.

Als wichtiger Schlüssel zur Verbesserung des Energieverbrauches erweist sich die Entwicklung einer Umrichter-generation mit LLC-Schwingkreis (**Bild 1**). LLC bezeichnet dabei die Beschaltung am Ausgang des Wechselrichters. Aufgebaut aus ungesteuertem Gleichrichter, Zwischenkreis-kondensator, IGBT-Wechselrichter und Ausgangsdrossel hat dieser Umrichter einen Wirkungsgrad von 97 % und einen konstanten  $\cos \varphi$  von 0,95 in allen Teillastbereichen. Weitere Schlüssel zur Erreichung des gesetzten Zieles sind optimal koppelnde Induktoren mit besonders verlustarmen

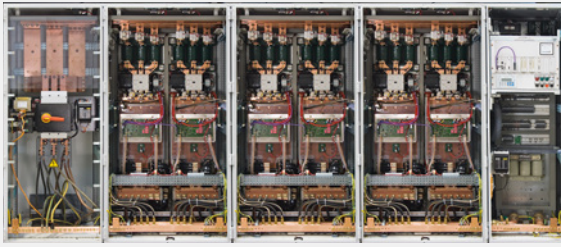
Kupferwickeln, der Einsatz von einer datenbankgestützten Software, sowie die Entwicklung eines Induktorkonzeptes zur Reduzierung der Abstrahlverluste.

### LLC-Umrichter eingesetzt in Zonen-technik (iZone)

Am Beispiel einer Stangenerwärmungsanlage hat jeder Induktor einen eigenen Umrichter und ist somit einzeln regelbar.

### Beispiel: Produktionsstart

Die Erwärmungszeit einer großformatigen Stange (z. B. mit 300 mm Durchmesser) von Raumtemperatur auf 1.250 °C kann bis zu 50 min betragen. Solange dauert es vom ersten Anfahren der Anlage, bis das erste Teil geschert werden kann. Bis dahin durchläuft die Stange die gesamte Induktorstrecke. Da die iZone-Steuerung immer die Position der Stange in der Erwärmungsanlage kennt, wird der jeweilige



**Bild 1:** LLC-Umrichter mit sechs Modulen

Folgeinduktor immer erst beim Einfahren der Stange zugeschaltet. Bei dieser Betriebsart der Anlage werden durch das systematische Zuschalten der Induktoren unnötige Energieverluste durch „leerlaufende“ Induktoren vermieden.

### Beispiel: Produktionsende

Bei Produktionsende erfolgt die Abschaltung der Induktoren in umgekehrter Reihenfolge. Nachdem die letzte Stange den jeweiligen Induktor verlassen hat, wird dieser abgeschaltet. Das Wissen um die Position der Stange in der Erwärmungsanlage ist auch hier die Grundlage für die Abschaltung der jeweiligen Induktoren im Auslaufprozess.

### Beispiel: Teildurchsatz

In den letzten Jahren sind die Anforderungen an eine flexible Produktion durch kleinere Losgrößen immer größer geworden, sodass moderne Erwärmungsanlagen auch energieeffizient Teildurchsätze realisieren müssen.

Mit den von dem Bediener eingegebenen Daten berechnet die iZone-Steuerung sofort die optimale Erwärmungsstrategie und passt die Induktorstrecke automatisch an. Es werden nur die Induktoren zugeschaltet, die für die Realisierung des vorgegebenen Teildurchsatzes erforderlich sind.

### Beispiel: Erwärmen rissempfindlicher Stähle (Softerwärmung)

iZone bietet aufgrund seiner individuell möglichen Leistungsvorgabe für den jeweils angeschlossenen Induktor auch die Möglichkeit, rissempfindliche Stähle zu erwärmen. Hierzu gehören zum Beispiel Kugellagerstähle wie 100Cr6. Um dies zu ermöglichen, musste in der konventionellen Umrichtertechnologie auf speziell gewickelte Induktoren zurückgegriffen werden, die eine sogenannte „Softerwärmung“ im Bereich unterhalb des Curiepunktes ermöglichten.

Mit der intelligenten iZone Steuerung in Kombination mit dem LLC-Umrichter gehört dieser früher notwendige Induktorwechsel der Vergangenheit an. Durch die entsprechende Vorwahl des zu erwärmenden Werkstoffs (z. B. 100Cr6) in der Steuerung wird die Erwärmungsanlage in Kombination mit dem gewünschten Durchsatz immer optimal eingestellt.

### Beispiel: Störungsstrategie bei EloForge und EloBar

*EloBar (Induktive Stangenerwärmung)*

In konventionellen Schmiedeprozessen muss eine Stangenerwärmungsanlage in der Regel z. B. bei einer Störung einer nachgeschalteten Heischere leergefahren werden. Ein erneutes Anfahren bedeutet insbesondere bei der Erwärmung von Stangen mit großem Durchmesser, wie oben beschrieben, eine lange Aufheizzeit. Der Produktionsausfall durch erneutes Anfahren

der Anlage ist hinsichtlich Energieeinsatz (erneutes Erwärmen bereits erwärmter Stangen) und Materialeinsatz nicht vertretbar.

Mit der Möglichkeit der individuellen Regelung der Induktoren ist ein definiertes, feinstufiges Warmhalten der gesamten Materialsäule in der Erwärmungsanlage heute ohne Probleme möglich. Die intelligente iZone-Steuerung errechnet im Voraus die Enthalpie (Wärmeinhalt) der Materialsäule in den einzelnen Induktoren. Das ermöglicht das individuelle Absenken der Leistung der Induktoren, sodass der jeweilige Energieinhalt der Stange nahezu konstant gehalten wird. Durch Reversieren der Stange (Vermeidung des „Zebraeffektes“ durch Auskühlung der Stangen in den Lücken zwischen den Induktoren) kann die Produktion nach Beseitigung der Störung direkt wieder aufgenommen werden.

*EloForge L (Induktive Blockerwärmung)*

Blockerwärmungsanlagen haben in der Regel keine Lücken zwischen den Induktoren. Hier kommt, wie oben beschrieben, eine ähnliche Strategie zum Einsatz. Ein Reversieren der Materialsäule ist hier aufgrund der nicht vorhandenen Lücken nicht erforderlich. Die Materialsäule bleibt stehen und wird auch hier durch individuelle Anpassung der Leistung der einzelnen Induktoren auf Temperatur gehalten. Durch eine speziell entwickelte, datenbankgestützte Software und Fahrweise kann das Umlaufmaterial gegenüber einer konventionell betriebenen Anlage um bis zu 80 % reduziert werden. Dieser Wert findet Bestätigung bei mehreren ausgelieferten Produktionsanlagen.

### Neues Induktorkonzept (Elo-ICE)

Eine Induktionsanlage besitzt immer eine wassergekühlte Kupferspule, die nur bei geringem Abstand zum Werkstück einen hohen elektrischen Wirkungsgrad besitzt. Im Bereich der Block- und Stangenerwärmung werden Induktionsspulen üblicherweise mit einem Feuerfest-Beton vergossen, sodass ein mechanischer und thermischer Schutz der Spule entsteht. Durch den direkten Einbau der wassergekühlten Kupferwicklung in den feuerfesten Beton wird eine sehr effektive Kühlung für die Auskleidung erzeugt, die allerdings eine relativ niedrige Auskleidungstemperatur und somit hohe thermische Verluste zur Folge hat. Durch Alterung und Infiltrationen sowie Zunder

lässt aber die mechanische Schutzwirkung nach. Außerdem ist ein feuerfester Beton im Hinblick auf die thermische Isolation nicht das optimale Material. Es entsteht ein starker Temperaturunterschied zwischen dem heißen Werkstück und der gekühlten Spule, was dazu führt, dass der thermische Wirkungsgrad der Induktionsspule im oberen Temperaturbereich nicht ideal ist.

An dieser Stelle setzt das neue Elo-ICE (Inductor Concept Efficiency)-System der SMS Elotherm GmbH an. Dank einer neuen, optimierten Isolation können Energie und Kosten eingespart werden. Möglich wird diese hohe Einsparung durch eine bis zu 50 %-ige Reduzierung der thermischen Verluste.

Bei der Neuentwicklung des Elo-ICE-Systems bestand die Herausforderung darin, die Temperaturdifferenz zwischen Werkstück und der Auskleidung möglichst gering zu halten, damit der Wärmestrom und damit der Wärmeverlust zur wassergekühlten Induktionsspule minimiert werden kann.

All dies konnte durch ein hybrides, feuerfestes Kompositsystem realisiert werden. Dieses besteht aus neuen Werkstoffen, die auch bei filigranen Formen noch extrem hohe Festigkeiten aufweisen. Neuartig ist ebenfalls, dass sich die unterschiedlichen Werkstoffe miteinander verbinden lassen und so ein mehrschichtiger coaxialer Aufbau mit exakt aufeinander abgestimmten Dimensionen und Eigenschaften entsteht. So lassen sich an der inneren, dem Werkstück zugewandten Seite verschleißfeste Eigenschaften realisieren, während zur kalten Kupferspule eine gute thermische Isolation erreicht wird.

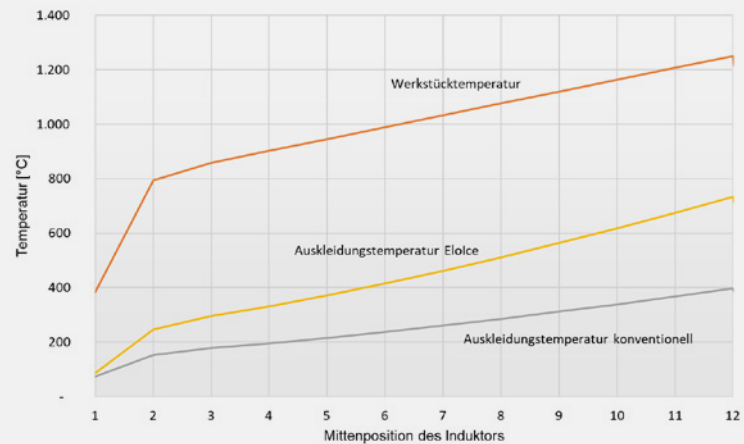
In Kooperation mit Partnern ist es der SMS Elotherm gelungen, eine Induktorauskleidung zu entwickeln, die als vorgegossenes Formteil ähnliche Festigkeiten erreicht wie eine konventionell gegossene Auskleidung, jedoch bei reduzierter Wandstärke und optimierten thermischen Eigenschaften.

Das neu entwickelte Elo-ICE-System hat im Vergleich zur herkömmlichen Auskleidung in vergossener Ausführung nur etwa die Hälfte der thermischen Verluste. Besonders interessant ist dieser Aspekt daher für große Querschnitte ab etwa 80 mm Durchmesser bzw. Kantenlänge. Die Energieeinsparungen, die durch diverse Versuche bei SMS Elotherm verifiziert wurden, liegen je nach Betrieb einer Anlage zwischen 4 und 6 %.

### Einspareffekte durch Elo-ICE

Beispielhaft werden hier die Einsparungen an einer Block-/Knüppelerwärmungsanlage dargestellt:

Das Beispiel besitzt 12 Induktoren mit einer Länge von 1.200 mm. Es werden unterschiedliche Werkstückdurchmesser betrachtet, die jeweils in einem dafür ausgelegten Induktor erwärmt werden.



**Bild 2:** Temperaturverlauf entlang der Erwärmungslinie

Zugrunde gelegt wird ein 3-Schicht Betrieb mit 6.000 h/a und ein für die Einsparungsrechnung konservativ angenommener Strompreis von nur 0,10 €/kWh.

**Bild 2** zeigt einen typischen Temperaturverlauf über der Länge. Aufgrund des weiten Durchmesserbereichs würden sich diese Verläufe in der Realität deutlich unterscheiden. Die Oberfläche der großen Durchmesser erreicht eher früher hohe Temperaturen, da mehr Zeit für eine ausreichende Durchwärmung benötigt wird.

Man erkennt, dass die Oberflächentemperatur der optimierten Auskleidung deutlich über der Temperatur einer konventionellen Feuerfestauskleidung liegt. Dies ist der Grund für die reduzierten Wärmeverluste.

Wie erwartet, ergibt sich das größte Einsparpotenzial bei hohen Temperaturen und somit erst bei den hinteren Induktoren.

Die Auswertung in **Tabelle 1** unterscheidet daher die Einsparungen für eine Gesamtanlage in dieser Ausführung, eine optimierte Isolation nur für die letzten sechs Induktoren, oder aber eine Ersparnis bei Wechsel des Auslaufinduktors gegen einen Elo-ICE Induktor. Bei einem Einschichtbetrieb sind die Einsparungen entsprechen geringer, allerdings immer noch nennenswert.

Selbst ein Induktor in optimierter Form kann zwischen € 8.000 und € 24.000 Einsparung im Jahr bringen. Diese ist sogar unabhängig vom Durchsatz, solange davon ausgegangen werden darf, dass die Oberflächentemperatur des Materials in diesem Induktor auf dem Niveau der zu erzielenden Auslauftemperatur liegt. In diesem Beispiel wurden 1.250 °C genommen.

Das energiesparende Elo-ICE-System besticht zudem dadurch, dass die Instandhaltung des Induktors deutlich servicefreundlicher und schneller gestaltet werden kann, da zeitaufwändige und mühsame Ausbrucharbeiten an konventionellem feuerfesten Beton entfallen und damit auch mögliche Beschädigungen an der Induktionsspule. Das reduziert letztendlich Produktionsstillstände und hohe Reparaturkosten.

**Tabelle 1:** Auswertung des Einsparpotenzials durch das Elo-ICE-System

Durchmesser	60	65	70	80	90	100	120	140	160	mm
Produktion	10,00	10,00	10,00	10,00	12,50	15,00	15,00	20,00	20,00	t/h
Preis per kWh	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	€/kWh
Jährl. Betriebszeit	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	h/a
<b>Elo-ICE</b>										
Einsparung Leistung	66	74	80	97	109	117	148	178	208	kW
Einsparung Energieverbrauch	7	7	8	10	9	8	10	9	10	kWh/t
Einsparung Kosten	0,66	0,74	0,80	0,97	0,87	0,78	0,99	0,89	1,04	€/t
Jährl. Einsparung	39.719	44.362	47.992	58.146	65.351	70.335	88.939	106.958	124.693	€/a
<b>Nur 6 Induktoren Elo-ICE</b>										
Einsparung Leistung	54	60	65	78	87	95	118	141	163	kW
Einsparung Energieverbrauch	7	7	8	10	9	8	10	9	10	kWh/t
Einsparung Kosten	0,66	0,74	0,80	0,97	0,87	0,78	0,99	0,89	1,04	€/t
Jährl. Einsparung	32.309	35.911	38.866	46.542	52.373	56.730	70.949	84.484	97.787	€/a
<b>Nur der letzte Induktor in Elo-ICE</b>										
Einsparung Leistung	13	15	16	19	21	23	28	33	38	kW
Einsparung Energieverbrauch	7	7	8	10	9	8	10	9	10	kWh/t
Einsparung Kosten	0,66	0,74	0,80	0,97	0,87	0,78	0,99	0,89	1,04	€/t
Jährl. Einsparung	8.072	8.909	9.593	11.248	12.632	13.911	17.019	19.950	22.760	€/a

### EloForge L (Induktive Blockerwärmung)

Den stetig wachsenden Anforderungen der Schmiedeindustrie an die Verfügbarkeit in Verbindung mit wartungsarmen Induktionsanlagen hat SMS Elotherm mit einem kompletten Re-Engineering im Bereich der induktiven Block- und Stangenerwärmungsanlagen Rechnung getragen. Parallel zu einem komplett neuen Konzept hinsichtlich

Prozesssicherheit, Verfügbarkeit, Reduzierung von Umlaufmaterial und auch von Ersatzteilen wurde unter anderem auch das Design der Erwärmungsanlagen auf den Prüfstand gestellt. Die daraus resultierenden Ergebnisse finden sich bereits heute bei einer Vielzahl der Kunden vor. Die in **Bild 3** abgebildete Erwärmungsanlage zeigt beispielhaft das Ergebnis des Bestrebens. Neu entwickelte Induktor-



**Bild 3:** EloForge Induktionsanlage der neuesten Generation mit Leerfahreinrichtung, Zonentechnik iZone, Stand-by-Betrieb und vollautomatischem Induktorwechsel



**Bild 4:** Induktive Stangenerwärmung für eine Hateburpresse des Typs HM75 mit einem Durchsatz von 20 t/h bei einem max. Stangendurchmesser von 90 mm



technik mit Führungsrohren mit einer nachgewiesenen Lebensdauer der Führungsrohre (Verschleißteil) von über einem Jahr sind so zur Normalität geworden. Wechselzeiten von einem Produkt auf ein neues Produkt innerhalb von 2 min sind heute Standard bei den Anlagen von SMS Elotherm, genauso wie das Leerfahren der Induktionsanlage unter Produktionsbedingungen bis zum letzten Block. Das spart Zeit und Geld. Warmhaltefunktion bei externen Störungen, wie zuvor beschrieben, gehören ebenfalls zum Standard, und auch verifizierte Verfügbarkeiten bis zu 99 % können bei entsprechenden Wartungsintervallen gewährleistet werden. Reduzierte Ersatzteilkhaltung durch konsequente Standardisierung ergänzen an dieser Stelle die aktuelle Generation der Baureihe EloForge. Zonentechnik und eine neue datenbankorientierte Software runden die Industrie 4.0-fähige Erwärmungsanlage ab.

### EloBar (Induktive Stangenerwärmungsanlage)

Der Fokus der Weiterentwicklung im Bereich der induktiven Erwärmung erstreckte sich im Hause SMS Elotherm nicht nur auf den Bereich der EloForge, sondern auch auf den Bereich der induktiven Stangenerwärmung EloBar. Energieeffizienz und Standardisierung standen hier genauso im Fokus wie ein ansprechendes Design, was sich im Aufbau der Erwärmungsanlage widerspiegelt.

Das Ergebnis der Entwicklung zeigt **Bild 4**, eine vor kurzem ausgelieferte Stangenerwärmungsanlage, die vor einer Hatebur Horizontalpresse des Typs HM75 steht. Das Induktorkonzept entspricht dem der EloForge L (induktive Blockerwärmung). Auch hier stand eine maximale Standardisierung und Verfügbarkeit in Kombination mit Wartungsfreundlichkeit im Mittelpunkt. Auch in Bezug auf die Peripherie, speziell der Materialzuführung (Stangenmagazin), die bei derartigen Großanlagen eine wichtige Rolle spielt, wurde der Fokus gelegt.

Auf Basis dieser Daten war SMS Elotherm mit der Herausforderung konfrontiert, eine Zuführung zu liefern, die eine einstündige Produktion ohne Befüllung des vorgeschalteten Stangenmagazins zu gewährleisten hat. Zudem sollte aufgrund der Länge der Induktionsanlage ein System zur Verfügung stehen, welches bereits erwärmte Stangen wieder vollautomatisch bereitstellt.

Das Resultat ist dargestellt in **Bild 5**. Das Stangenmagazin hat eine Kapazität von 30 t. Die Warmablage, dargestellt auf der linken Seite des Bildes, stellt sicher, dass nach einer Störung der Presse zurückgefahrte Stangen nach einer entsprechenden Abkühlzeit dem Prozess wieder vollautomatisch zugeführt werden können.

### Zusammenfassung und Ausblick

Die neuen Technologien ermöglichen dem Betreiber eine flexible Produktion durch den Einsatz modularer Komponenten in Verbindung mit der innovativen Zonentechnik



**Bild 5:** Stangenmagazin mit einer Kapazität von 30 t inkl. Warmablage

iZone. Intelligente Energieverteilung bei jedem Durchsatz, geringster Energieverbrauch durch sukzessives Anfahren und Leerfahren der Anlage sowie das Warmhalten der Materialsäule bei Störungen in Kombination mit dem EloICE Konzept werden der Forderung nach einer nachhaltigen Steigerung der Ressourcen- und Energieeffizienz in der Massivumformung in jeder Form gerecht.

Die konsequente Weiterentwicklung von Induktionsanlagen, basierend auf den stetig steigenden Anforderungen der Schmiedeindustrie bzgl. der Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes, hoher Verfügbarkeit gepaart mit einer reduzierten Ersatzteilkhaltung, stellen eine große Herausforderung an die Produzenten von Induktionsanlagen dar. Die vorgestellten Konzepte werden diesen Anforderungen aktuell gerecht [1].

### LITERATUR

- [1] Langejürgen, M.; Krammer, H.: Vorteil von Hybrid-Erwärmung und neuen Induktorkonzepten bei der Schmiedeerwärmung; Prozesswärme 4 (2019)

### AUTOREN



Dipl.-Ing. **Jochen Gies**  
SMS Elotherm GmbH  
Remscheid  
j.gies@sms-elotherm.com



Dr.-Ing. **Markus Langejürgen**  
SMS Elotherm GmbH  
Remscheid  
m.langejuergen@sms-elotherm.com