

# Induktive Erwärmungsanlagen für Sonderwerkstoffe

von **Stefan Beer**

Die induktive Erwärmung ist ein leistungsfähiges Verfahren, welches auch bei der Erwärmung von Sonderwerkstoffen prozesstechnische Vorteile bietet. Die hier angesprochenen Metalle wie Zirkonium-, Niobium-, Titan- sowie Molybdänlegierungen lassen sich in modernen Induktionsöfen wirtschaftlich erwärmen. Der nachfolgende Artikel beschreibt ein Anlagenkonzept, welches für die Erwärmung mit einer extrem großen Varianz hinsichtlich der Bolzengeometrien und Einsatzmaterialien für eine Strangpresse eingesetzt wird.

## Induction heating of special alloys

Induction heating is an efficient and extremely flexible method also for the pre-heating of special alloys and could offer many advantages compared to conventional furnaces. This article describes the implementation of a powerful induction heating system for the pre-heating of special materials like titanium, zirconium and other alloys into an extrusion line.

Das Strangpressverfahren wird wegen seiner Leistungsfähigkeit bei der Herstellung von Rohren und Profilen aus Sonderwerkstoffen eingesetzt. Neben Strangpressanwendungen wird die Induktionserwärmung auch zur Vorerwärmung von Stangen verwendet, die in Schmiedeanlagen weiter bearbeitet werden.

Die in diesem Artikel behandelten Materialien werden trotz der nur scheinbar geringen Verbreitung in den unterschiedlichsten Anwendungen und Produkten verwendet. Rohre aus Zirkonium werden beispielsweise für die Hüllrohre der Brennstäbe in der Nukleartechnik eingesetzt. Halbzeuge aus Titanlegierungen haben einen hohen Verbreitungsgrad in der Medizintechnik für Implantate, werden aber auch im Flugzeug- und Turbinenbau verwendet, wenn es auf hohe Festigkeit bei gleichzeitig niedrigem Gewicht ankommt. Titan hat ein spezifisches Gewicht von ca. 4,5 kg/dm<sup>3</sup> und ist damit fast um die Hälfte leichter als Stahl, bei Festigkeitswerten die mit vergüteten Stählen vergleichbar sind und die auch in höheren Temperaturbereichen gelten. Gleichzeitig sind Titanlegierungen sehr korrosionsbeständig.

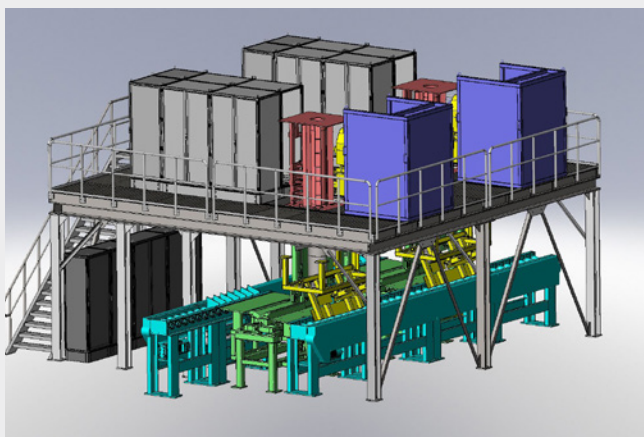
Molybdänrohre kommen aufgrund ihrer Temperaturbeständigkeit zum Einsatz [2], zum Beispiel bei Drehrohröfen für Verbrennung von Sondermüll oder auch Kalzinierungsprozessen.

Weitere Einsatzgebiete für diese Sonderwerkstoffe sind:

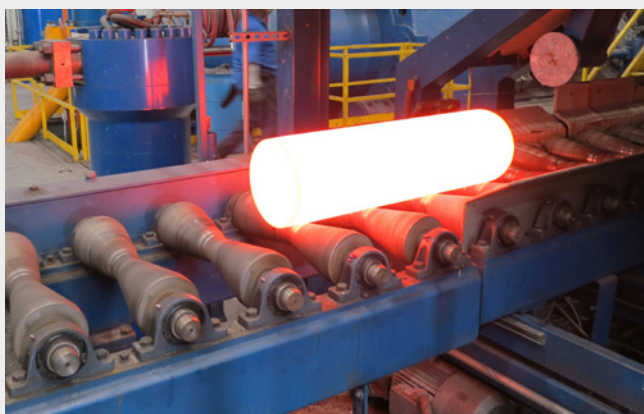
- Chemie und Petrochemie,
- Kraftwerkstechnik,
- Müllverbrennung,
- Maschinen- und Anlagenbau,
- Nuklearindustrie,
- Luft- und Raumfahrt,
- Marinetechnik,
- Biotechnologie und Medizintechnik.



**Bild 1:** Mit graphithaltiger Suspension vorbehandelter Zirkoniumbolzen (Quelle: IAS GmbH)



**Bild 2:** Vertikale Doppelstationen – Anlage zur Erwärmung von Titanblöcken



**Bild 3:** Titanbolzen mit einer Erwärmungstemperatur von ca. 1.150 °C



**Bild 4:** Anlagenbeispiel einer Erwärmungsanlage für Zirkonium

Je nach Pressengröße liegen typische Bolzenabmessungen im Durchmesserbereich von 170–400 mm bei Bolzenlängen von bis zu 1.500 mm. Die Durchsatzzahlen bewegen sich von 4 bis 15 Block je Stunde.

Der Temperaturbereich innerhalb des gesamten Erwärmungsprozesses liegt im Bereich von 700 °C bei Zirkoniumlegierungen und 1.350 °C bei Molybdänlegierungen. Aufgrund dieser Eckparameter wird sehr schnell ersichtlich, dass an die Erwärmungsanlage sehr hohe Ansprüche gestellt werden.

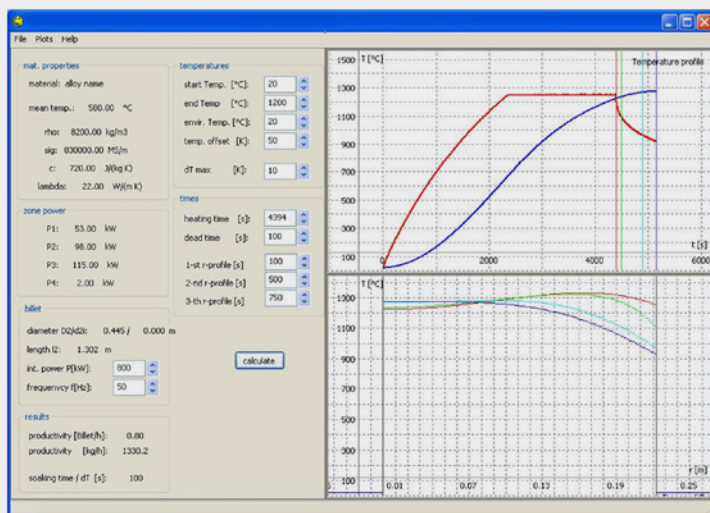
Da es sich innerhalb der Prozesskette in der Regel um sehr kleine Losgrößen handelt, sind traditionelle Erwärmungsverfahren weniger leistungsfähig. So sind zum Beispiel gasbeheizte Drehherdöfen mit reduzierter Atmosphäre sowie gas- oder widerstandsbeheizte Atmosphärenöfen bezüglich der Flexibilität von Induktionsanlagen unterlegen. Solche Systeme werden in erster Linie bei höheren Durchsätzen gleicher Materialien und ähnlicher Abmessungen verwendet [1, 3].

Die besonderen Eigenschaften dieser Sondermaterialien liegen in der ausgeprägten Oxidationsneigung, die schon unterhalb der Prozesstemperatur einsetzt, sowie der Sublimierungseffekte. Ein weiterer Aspekt ist die schlechte bis mittlere Wärmeleiteigenschaft. Bei Titanlegierungen liegt die Wärmeleitfähigkeit im Bereich von 10–15 W/m K, bei Zirkoniumlegierungen bei ca. 13–21 W/m K und bei Molybdänlegierungen bei ca. 140 W/m K. Gleichzeitig sind die spezifischen Leitfähigkeiten der einzelnen Werkstoffe sehr unterschiedlich. Diese Unterschiede müssen bei der Gestaltung der Induktionsanlage berücksichtigt werden.

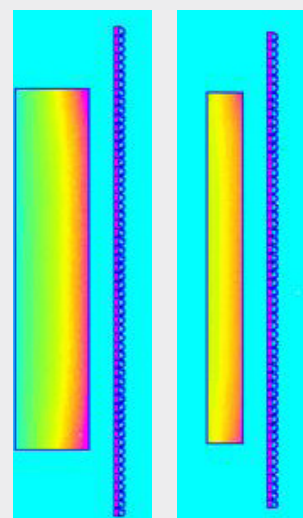
Weitere besondere Anforderungen ergeben sich durch prozessbedingte Einflüsse. Bei der Zirkoniumrohrherstellung sind die vorbereiteten Bolzen aufgrund der starken Oxidationsneigung vor dem Erwärmungsprozess mit einem oxidationshemmenden Schutzfilm beschichtet. Bei dem Strangpressprozess in dem geschilderten Temperaturbereich ist die Schmierung des erwärmten Bolzens ein zwingender Prozessschritt, der das Verfahren erst ermöglicht. Die Bolzen werden daher sowohl mit graphithaltigen Ölsuspensionen (Zirkoniumbolzen) als auch mit einer Glaschmierschicht überzogen [1, 2].

**Bild 1** zeigt einen vorbereiteten Zirkoniumbolzen, welcher mit einer graphithaltigen Suspension vorbehandelt wurde. Bedingt durch die unterschiedlichen Materialeigenschaften und verschiedenen Einsatzgutgeometrien sowie vorstehend beschriebene prozessbedingte Einflüsse sind folgende Aspekte bei der Dimensionierung der Induktionsanlage und der zugehörigen Fördertechnik zu berücksichtigen [3]:

- Variable Spulenlängen mit einzonigen Spulen und Längenzapfungen oder mehrzonige Spule, deren Zonen einzeln regelbar sind,
- stufenlose Leistungsregelung mit modernen IGBT-Umrichtern,



**Bild 5:** Software für die Simulation des Heizzyklus



**Bild 6:** Bolzen mit verschiedenen Innendurchmessern (30 + 190 mm) bei einer einlagigen Spule

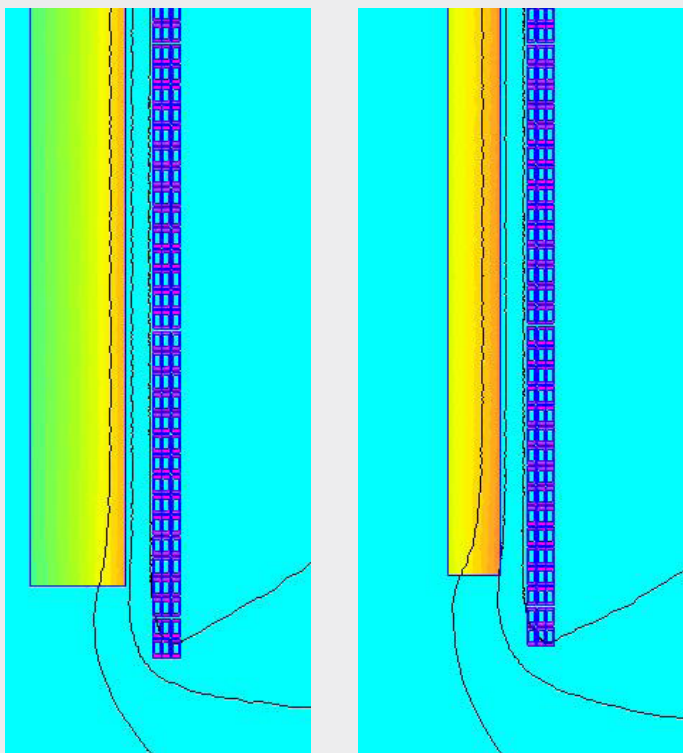
- stark veränderliche Eigenschaften, die sich auf den Erwärmungsprozess auswirken. Bei Titanlegierungen findet bei ca. 860-890 °C je nach Legierungszusammensetzung eine sogenannte Beta-Transus (TB) Phasenänderung statt. Dadurch wird bei konstanter Leistungszuführung die Erwärmungsgeschwindigkeit geringer;
- veränderbarer Bereich der Arbeitsfrequenzen (typischerweise von 50-300 Hz) je nach Blockgeometrie und Einsatzmaterial,
- Wirkleistungsmessung zur Erfassung der zugeführten Leistung (Energieeintragungsmessung), da optische Temperaturmessungen durch Sublimierungseffekte (insbesondere bei Molybdän) und die damit verbundene Rauchentwicklung beeinträchtigt werden. Dies gilt ebenso, wenn graphithaltige Schmiermittel sublimieren,
- simulationsgestützter Erwärmungsprozess, um Prozessparameter zu optimieren,
- Spulenaufbau, der das Einleiten von Inertgas ermöglicht, um die Oxidation zu reduzieren, insbesondere bei der Titanblockerwärmung,
- Reduzierung von Einflüssen der Konstruktion auf das Erwärmungsgut während des Erwärmungskonzeptes, daher sind überwiegend vertikale Erwärmungsanordnungen sinnvoll,
- schnelle Transporteinrichtungen, um die Wärmeverluste des Bolzens auf dem Transportweg zur Strangpresse zu reduzieren.

Um Rückwirkungen infolge von Wärmeableitungen zu minimieren und um die negative Beeinflussung der Füh-

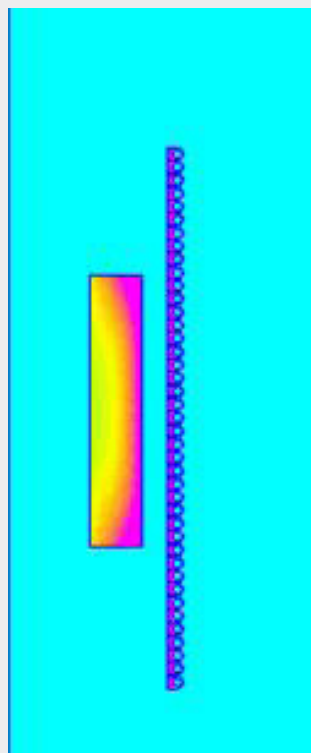
rungsschienen auf die Temperaturverteilung im Block in einer horizontalen Erwärmungslinie vollständig zu vermeiden, werden die Blöcke von einer horizontalen Lage durch eine 90° Drehung in eine vertikale Position gebracht. Der Bolzen kann unterschiedliche Längen aufweisen. Um eine definierte Positionierung des Bolzens in der Spule zu gewährleisten, ist oberhalb ein Gegenhalter installiert. Mit einer speziellen Vorrichtung werden die Bolzen gewendet und definiert in die mehrzonige Spule eingefahren, bis die obere, definierte Position erreicht wird. **Bild 2** zeigt den typischen Aufbau einer solchen Erwärmungsanlage. In **Bild 3** ist ein Titanbolzen mit einer Erwärmungstemperatur von 1.150 °C zu sehen, **Bild 4** zeigt ein Anlagenbeispiel einer Erwärmungsanlage für Zirkonium.

Da insbesondere bei der Nutzung einer reinen Wirkleistungsmessung für eine reproduzierbare Erwärmung die Prozessparameter mit Heizversuchen zur Referenzierung für einen datenbankgestützten Produktionsbetrieb ermittelt werden müssen, simuliert eine Software den zu erwartenden Heizzyklus. Aufgrund der hohen Kosten für Versuchsblöcke ist dies ein sinnvolles Anlagentool (**Bild 5**).

Die Messung der zugeführten Leistung vom Umrichter ist eine wichtige Prozessgröße, um hier einen wiederholbaren Erwärmungsprozess sicherzustellen. Für die vorgegebene Blockgeometrie und anhand der Materialeigenschaften des Blockes in dem gewünschten Temperaturbereich wird sein Bruttoenergiebedarf automatisch ermittelt. Das Verfahren ermöglicht auch eine Plausibilitätsprüfung bei



**Bild 7:** Bolzen mit verschiedenen Innendurchmessern (30 + 190 mm) bei einer mehrlagigen Spule



**Bild 8:** Darstellung der Kantenerwärmung bei falscher Bolzenpositionierung

erschweren Bedingungen für die Temperaturmessung.

Weitere Besonderheiten bei der induktiven Erwärmung dieser stark unterschiedlichen Materialien in einer Anlage liegen in der richtigen Positionierung des Blockes innerhalb der Spule, sowie bei der richtigen Frequenzwahl, die hier eine optimale Erwärmung und einen guten Wirkungsgrad

sicherstellt. Anhand der großen Varianz der Blockabmessungen wird in der Regel mit Spulensätzen gearbeitet, die innerhalb eines größeren Durchmesserbereiches eingesetzt werden können, um auch die Umrüstzeiten zu minimieren. Hier gilt der Ansatz für den unteren Einsatzgutdurchmesser, dass  $0,8 \times D_{\text{enn}}$  nicht unterschritten werden sollte, um eine vernünftige Erwärmung sicherzustellen. Die **Bilder 6 - 8** zeigen die Einflüsse der Blockgeometrie auf die Lage in der Spule, sowohl bei einer einlagigen als auch bei einer mehrlagigen Spulenausführung dargestellt.



**Bild 9:** Mehrzonige Induktionsspulen für Sonderwerkstoffe

In Bild 6 sind Bolzen aus einer Titanlegierung mit verschiedenen Innendurchmessern (30 + 190 mm) und gleicher Speisefrequenz bei einer einlagigen Spule zu sehen. Bild 7 zeigt Titanlegierung mit verschiedenen Innendurchmessern (30 + 190 mm) und gleicher Speisefrequenz bei einer mehrlagigen Spule. Bei diesen Simulationen ist klar erkennbar, dass hier die mehrlagige Spulenausführung bei gleicher Arbeitsfrequenz mit einem kleineren Spulenüberstand zum Einsatzgut dimensioniert werden muss. Der Einfluss der Endenerwärmung sowie das Anpassen an das Einsatzgut hinsichtlich Material und Bolzenabmessung erfordert einen variablen Spulenüberstand sowie eine Frequenzanpassung des Leistungsteils.

Nachfolgend ist noch einmal dargestellt, wie stark die Kantenerwärmung ausgeprägt sein kann, wenn der Bolzen in der Spule nicht richtig positioniert wird. Diese

Kantenerwärmung lässt sich mit einer zu hoch gewählten Arbeitsfrequenz noch verstärken (Bild 8). Innerhalb des Prozesses sind etwas höhere Stirnflächentemperaturen besonders auf der Werkzeugseite gewünscht, um hier auch den Abstrahlverlusten auf dem Transportweg entgegenzuwirken. Diese sind jedoch nur in einem bestimmten Maß zulässig. Aufgrund der erhöhten Abstrahlverluste in diesem Temperaturbereich kommt dem Transportsystem hinsichtlich Geschwindigkeit und Positioniergenauigkeit eine recht hohe Bedeutung zu.

## FAZIT

Das induktive Erwärmungsverfahren ist auch bei der Erwärmung von Sonderwerkstoffen gut einsetzbar. Aufgrund der hohen Varianz bei den eingesetzten Werkstoffen in typischen Fertigungslinien ist hier eine hohe Flexibilität seitens der Erwärmungsanlage gefordert (**Bild 9**). Durch intelligente Anlagenkonzepte kann hier den Anforderungen seitens des Betreibers entsprochen werden. Da die Losgrößen in der Regel sehr klein sind, hat ein Induktionsofen sowohl hinsichtlich Energiekosten, Platzbedarf und Aufheizvermögen erhebliche Vorteile gegenüber konventionell beheizten Anlagen. Der elektrische Wirkungsgrad an den Spulen liegt beim Einsatz von Sonderlegierungen, je nach Material und Blockmessungen, bei bis zu 83 %.

## LITERATUR

- [1] Bauser, Sauer, Siegert: Strangpressen (2001). Aluminium Verlag Düsseldorf
- [2] Muschalik, U.: Vortrag bei S+C Edelmetallakademie 9-2010, Moderne Strangpresstechnik für die Produktion von hochlegierten, nahtlosen Stahlrohren
- [3] Beer, S.: Einsatz von Induktionsanlagen in der Produktion von stranggepressten nahtlosen, hochlegierten Edelstahlrohren, ewi – elektrowärme international (2011), 1

## AUTOR



Dipl.-Ing. **Stefan Beer**  
IAS GmbH  
Iserlohn  
Tel.: 02371 / 4346-30  
s.beer@ias-induction.com



## 4. ewi-Praxistagung Elektrothermische Prozesse zum **WÄRMEBEHANDELN & UMFORMEN**

28.-30. April 2015, Atlantic Congress Hotel, Essen • [www.ewi-erwaermen.de](http://www.ewi-erwaermen.de)

### Termin:

- Dienstag, **28.04.2015** (optional)  
Grundlagenseminar (14:00 – 17:30 Uhr)
- Mittwoch, **29.04.2015**  
Tagung (09:00 – 17:00 Uhr)  
Abendveranstaltung ab 19:00 Uhr

- Donnerstag, **30.04.2015**  
Workshops (09:00 – 13:30 Uhr)

### Ort:

Atlantic Congress Hotel, Essen,  
[www.atlantic-hotels.de](http://www.atlantic-hotels.de)

### Zielgruppe:

Betreiber, Planer und Anlagenbauer von  
Wärmebehandlungs- und Umformanlagen

Veranstalter:



Institut für  
Elektroprozessentechnik



sponsored by

