

Verbesserung der Temperaturgleichmäßigkeit in induktiven Vergütelinien

von **Markus Langejürgen, Christian Vogt, Stefan Dappen, Helmut Krammer, René Harjes**

Einheitliche Prozessergebnisse erfordern eine hohe Temperaturhomogenität sowie eine geeignete Prozessüberwachung. Bei Schwankungen der Rohrgeometrie von nahtlosen Rohren, insbesondere aufgrund von Wandstärkenvariationen und aufgestauchten Rohrenden (Upset Ends), werden allerdings Temperaturschwankungen beobachtet. Zur Optimierung der Temperaturhomogenität der Rohre wurde ein leistungsstarkes Booster-System entwickelt. Ergänzt um einen dynamischen Regelalgorithmus und eine spezielle Temperaturmessung können Temperaturschwankungen, die aus verschiedenen Gründen verursacht wurden, genau erfasst und ausgeglichen werden.

Improvement of temperature homogeneity in inductive heat treatment lines

Uniform process results require high temperature homogeneity as well as suitable process monitoring. Especially for geometrical variations of seamless pipes temperature variations are observed, due to wall thickness variations and so called upset ends. To optimize the temperature homogeneity of the pipes a powerful booster coil system has been developed. A dynamic control algorithm and a special pyrometer setup enable the discussed system to accurately detect and compensate temperature variations caused by various reasons.

Das induktive Vergüten (Q&T process) ist ein vielseitig einsetzbarer und wirtschaftlich interessanter Prozess zur Wärmebehandlung von Stangen und Rohren. Der grundlegende Aufbau einer solchen Wärmebehandlung umfasst eine Erwärmungsstrecke zum Austenitisieren, teilweise ergänzt um eine Ausgleichsstrecke, ein Abschrecksystem, geeignet zur Erzielung einer definierten Mindesthärte, und schließlich eine Anlassstrecke zur Einstellung der Werkstoffeigenschaften (Zugfestigkeit, Streckgrenze und Härte) entsprechend der geforderten Qualität.

TEMPERATURSCHWANKUNGEN BEIM INDUKTIVEN ERWÄRMEN VON ROHREN

Typische Temperaturschwankungen einer Q&T-Linie zeigt **Bild 1** am Beispiel eines Produktionslaufs für ein Rohr mit einer Wandstärke von 10 mm und einem Durchmesser von 90 mm. Die beobachteten maximalen Temperatur-

schwankungen sind beim Härten ΔT bis 70 K (± 35 K) und beim Anlassen ΔT bis 36 K (± 18 K).

Um die Temperaturhomogenität zu verbessern, ist es notwendig, die verschiedenen Arten von Temperaturschwankungen und deren Ursachen zu verstehen. **Bild 2** zeigt einen Probestemperaturverlauf und weist auf die verschiedenen Arten von Temperaturschwankungen hin, die bei der induktiven Rohrerwärmung auftreten.

In diesem speziellen Fall hatten die erzeugten Rohre angestauchte Enden, sodass die Wandstärke an beiden Enden der Rohre stark erhöht ist, um sie später mit einem Gewinde entsprechend der halben Länge einer Kuppelungsverbindung zu versehen. Diese aufgestauchten Enden wirken wie eine lokale Erhöhung des Rohrdurchsatzes, da die Leitungsgeschwindigkeit gleich ist, aber die Wandstärke und der Außendurchmesser deutlich erhöht werden.

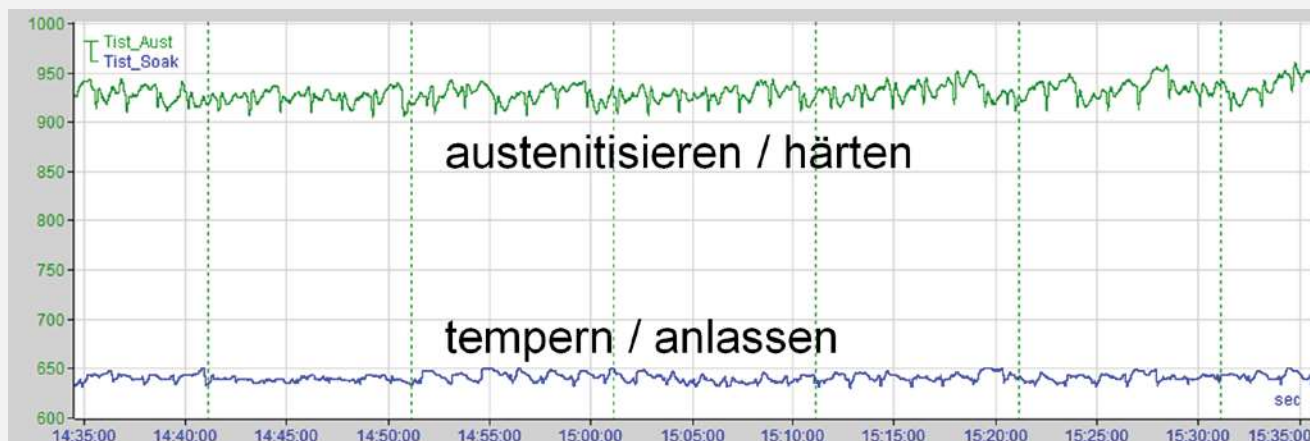


Bild 1: Temperaturverlauf über einem Produktionslos

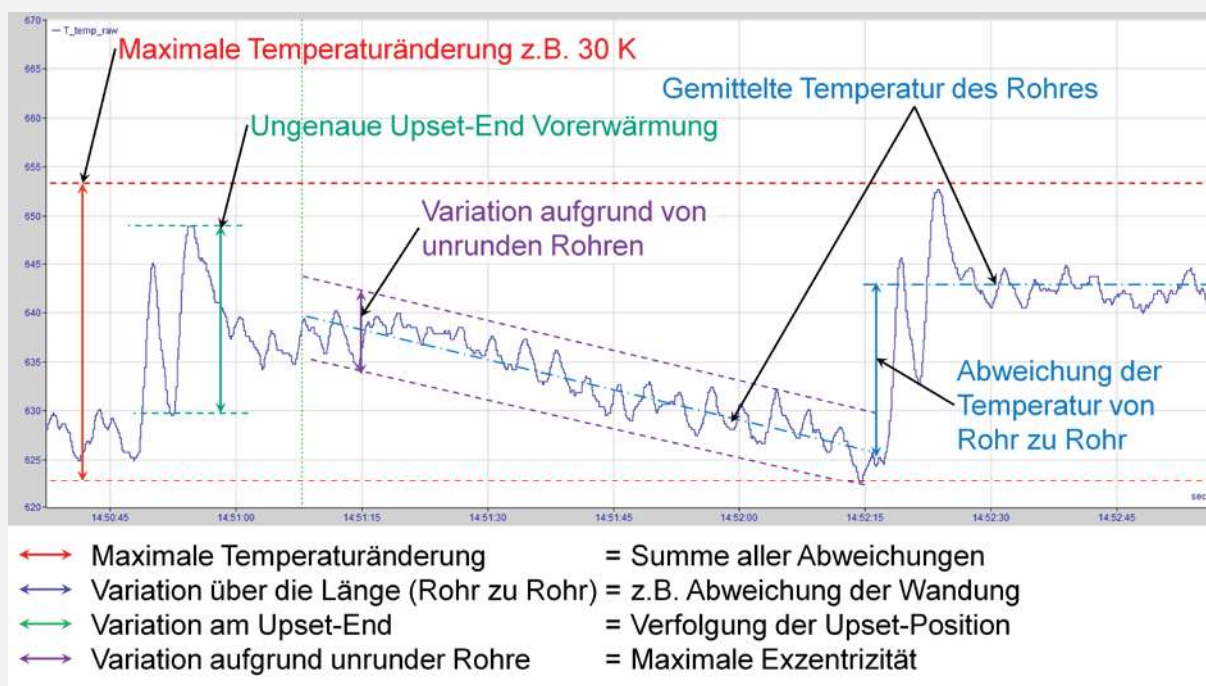


Bild 2: Mögliche Temperaturschwankungen am Rohr

Die Rohrexzentrizität wird durch den Herstellungsprozess (Piercing und Warmwalzwerk) von nahtlosen Rohren verursacht und tritt bis zu einem gewissen Grad auf allen Arten von nahtlosen Rohren auf. Typischerweise drehen sich die Rohre entlang der Achse auf einer induktiven Q&T-Linie, um ein Durchbiegen zwischen den Auflagerrollen zu vermeiden. Die Wandstärkenvariation bewirkt dann eine spezielle näherungsweise sinusförmige Schwankung auf dem Temperaturmesssignal.

Drei Haupteffekte verursachen die Temperaturschwankung über der Rohrlänge (**Tabelle 1**).

Temperaturschwankungen aufgrund von Wandstärkenschwankungen im Rohrquerschnitt (Wiederholung jeder Umdrehung)

Die Untersuchungen der Temperaturkurven zeigen sofort eine Beziehung zwischen der gemessenen Temperaturänderungsfrequenz und der Rotationsgeschwindigkeit des Rohres. Aufgrund der unterschiedlichen Wandstärke im Rohrquerschnitt variiert auch die örtlich gemessene Rohrtemperatur, da die Heizleistung über der Rohroberfläche gleichmäßig ist (dünnere Wandstärke = heißeres Material). Ein Beispiel ist in **Bild 3** gezeigt, wobei die minimale Wandstärke der höchsten Temperatur entspricht.

Temperaturschwankungen in Längsrichtung (Änderungen der Wandstärke über der Rohrlänge)

Die Hauptursache der Temperaturschwankungen entlang der Rohrlänge sind die Änderungen in der Wandstärke in Längsrichtung, die ebenfalls bereits durch das Lochen und Walzen des Nahtlosrohrs verursacht werden. Temperatur- und sonstige Prozessabweichungen im Walzwerk bedingen eine Änderung der Wandstärke bereits im Mutterrohr. Diese Streuung der Wandstärke führt, je nach Güte des Walzprozesses, zu deutlichen Änderungen der mittleren Rohrtemperatur bei der induktiven Erwärmung bzw. Wärmebehandlung.

Diese Schwankung kann durch ein System ausgeglichen werden, das die Temperaturschwankung in Längsrichtung bereits während der Erwärmung misst und darauf reagiert. Ein gesonderter Induktor mit kurzer Reaktionszeit und hoher Heizleistung würde örtlich begrenzt die Rohrtemperatur entsprechend der lokalen Abweichung erhöhen.

Bild 4 zeigt ein Beispiel für die Temperaturschwankungen in Längsrichtung und die Abweichungen von Rohr zu Rohr.

Statistische Zusammenhänge zwischen den Temperaturschwankungen

Beide Arten von Temperaturschwankungen als Folge lokaler Wandstärkenunterschiede treten immer gleichzeitig auf. Die entsprechende Produktnorm für Rohrgüten begrenzt die zulässigen Wandstärkentoleranzen und damit deren maximale Auswirkung auf die Temperaturschwankungen. Die API-Norm 5L [1] lässt beispielsweise Wandstärkenschwankungen von +15 % bis -12,5 % zu, die API 5CT [2] lässt ähnliche Abweichungen zu. **Tabelle 2** zeigt die daraus resultierenden effektiven Wandstärken für

Tabelle 1: Ursachen für Temperaturschwankung über der Rohrlänge

Beobachtung	Ursache
Schwankung von ca. 20 K	Erhöhter Leistungsbedarf am angestauchten Rohrende
Hochfrequenzkomponente	Rohrexzentrizität
Temperaturabfall über der Rohrlänge	Wandstärkenschwankungen in Rohrlängsrichtung

Tabelle 2: Wandstärkeschwankungen entsprechend der API 5L [1]

Durchmesser [mm]	Wandstärke [mm]	Max. Wandstärke [mm]	Min. Wandstärke [mm]
114,3	6,3	7,25	5,51
88,9	9,5	10,93	8,31
73,02	5,5	6,33	4,81
60,32	4,3	4,95	3,76

typische Q&T-Rohrgrößen.

Die mechanischen und metallurgischen Anforderungen an eine Rohrgüte begrenzen die maximal zulässigen Temperaturschwankungen. Am Beispiel der API 5CT Güte

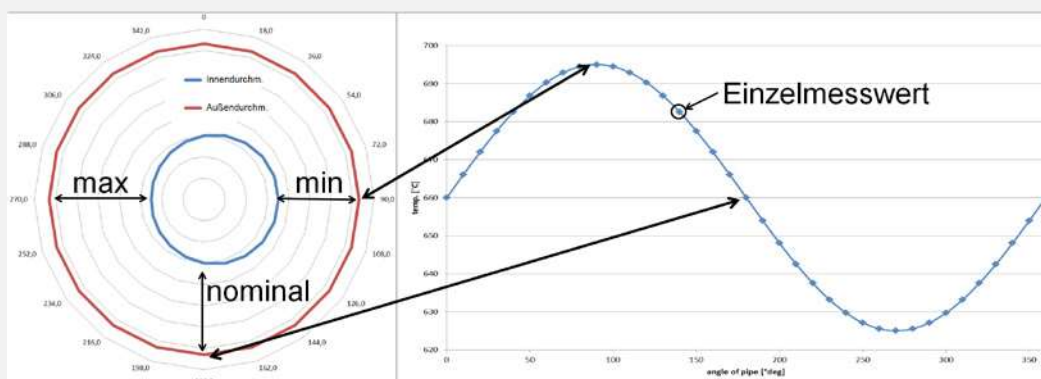


Bild 3: Zusammenhang von Wandstärken- und Temperaturschwankung

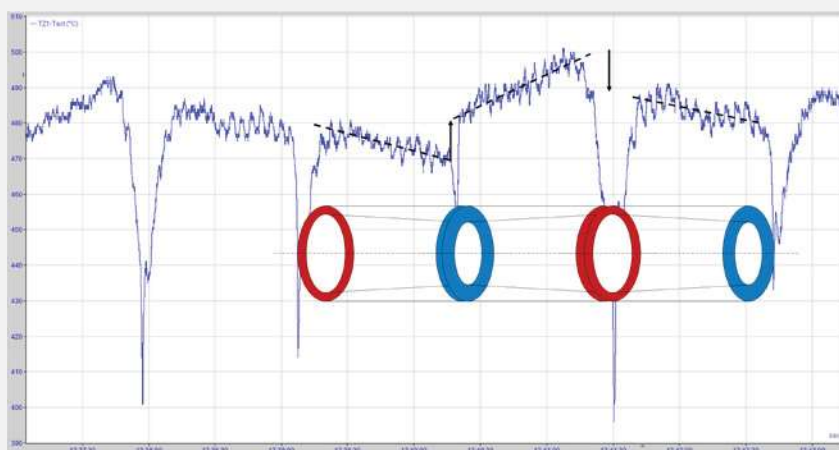


Bild 4: Messdaten als Beispiel für Temperaturschwankungen in Längsrichtung

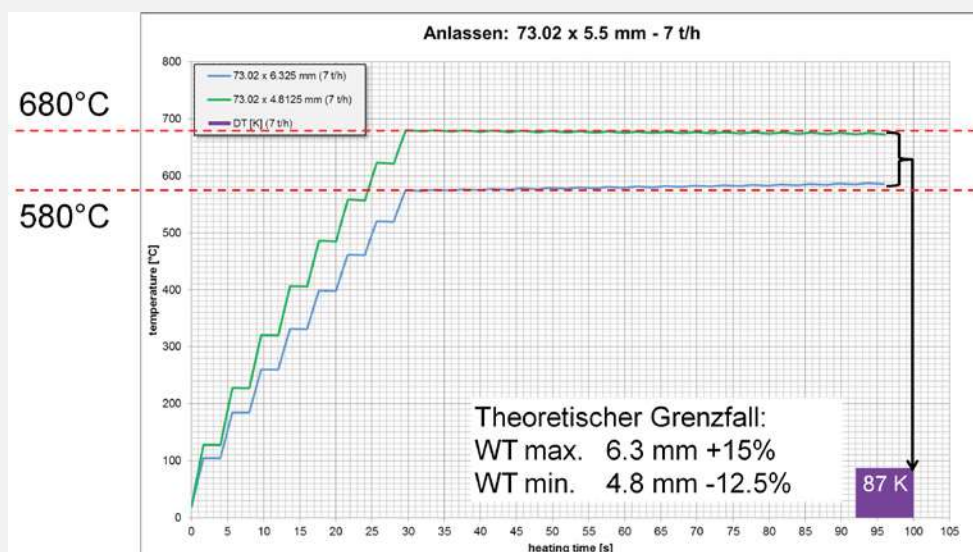


Bild 5: FEM Simulation für die Anlasstemperaturen bei Rohrdickenschwankungen nach Norm

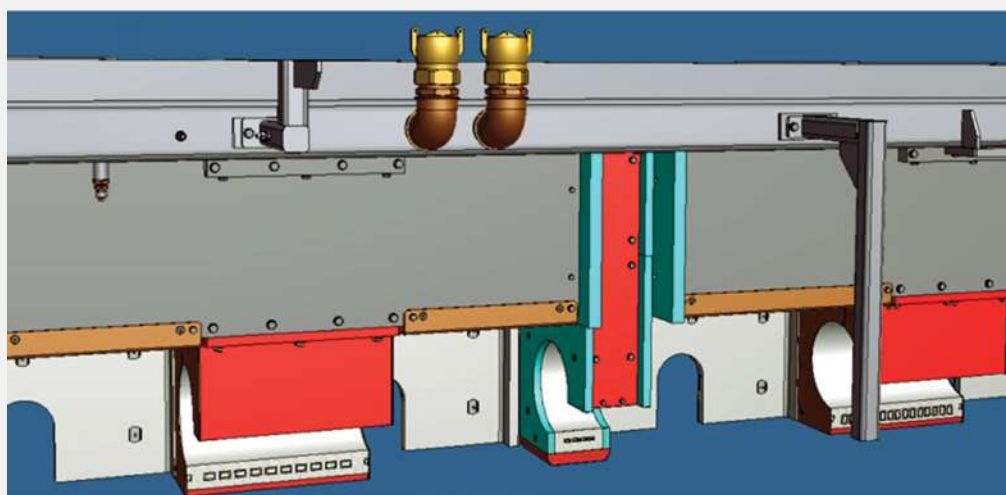


Bild 6: Beispiel eines Booster-Induktors

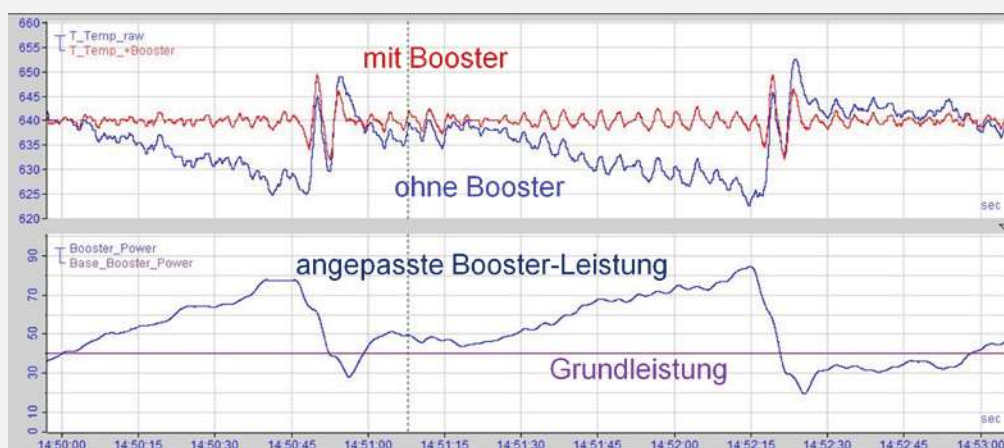


Bild 7: Einfluss des Boosters auf die Rohrtemperatur

P110 erfordert das Anlassen eines Rohrs 73,05 x 5,5 mm ein Temperaturfenster von 580–680 °C [2]. Elektromagnetisch-thermische FEM Simulationen zeigen, dass dieses Temperaturfenster für alle zulässigen Wandstärken eingehalten werden kann (**Bild 5**). Dieser theoretische Fall lässt jedoch keinen Spielraum mehr für sonstige Schwankungen bei der Prozessstabilität bzw. Temperaturkontrolle. Eine grundlegende Anforderung an Vergütelinien ist das Einhalten möglichst enger Temperaturtoleranzen, gleichzeitig ist es für den Walzprozess einfacher, die Wandstärkentoleranzen etwas lockerer handzuhaben. Dieser Zielkonflikt kann durch das unten vorgestellte System aufgelöst werden.

VERÄNDERUNGEN AM MASCHINEN-KONZEPT

Maßnahmen zur Reduzierung der Schwankungen in Längsrichtung

Temperaturschwankungen in Längsrichtung können (bis zu einem gewissen Grad) reduziert werden, indem eine induktive Q&T-Linie mit einem niedrigeren Durchsatz gefahren wird oder indem bereits im Design der Linie lange Haltezonen vorgesehen werden. Dies würde jedoch einen der Hauptvorteile der induktiven Wärmebehandlung reduzieren, da diese Maschinen typischerweise eher kurz sind und hohe Heizraten aufweisen. Daher ist der beste Ansatz zur Verringerung von Temperatur-

schwankungen in Längsrichtung die Einbindung eines dynamischen Booster-Systems. Die Temperaturmessung erfolgt durch ein spezielles Pyrometer-Setup vor und nach dem Booster-Induktor, um diese Heizeinheit komplett unabhängig vom Rest der Linie zu steuern. Die Rohre müssen bereits eine gewisse Temperatur aufweisen, um die Temperaturschwankungen in Längsrichtung zu zeigen.

Der Booster-Induktor selbst (**Bild 6**) muss deutlich kürzer ausgeführt werden als die Erwärmungsinduktoren, um das Rohr nur lokal in den kälteren Bereichen zu erwärmen und so die räumliche Auflösung des Systems zu verbessern.

DESIGN DES BOOSTER-SYSTEMS

Die kurzen Booster-Induktoren werden auf kurze Reaktionszeiten und hohe Heizleistungen hin optimiert.

Eine automatische Temperaturregelung benötigt:

- Die Messung der mittleren Rohrtemperatur einlaufseitig vom Booster-Induktor
- Temperaturmessung nach dem Booster-System zur Prozessüberwachung und Prozesssteuerung.

Umrichter und Schwingkreis werden auf kurze Reaktionszeiten und Unempfindlichkeit gegenüber dem Streufeld der unmittelbar benachbarten Induktoren ausgelegt.

Der eigentliche Booster-Induktor wird auf die gleiche Art und Weise zwischen zwei Rollen des Rollgangs sitzen wie die herkömmlichen Induktoren. In diesem Bereich können darüber hinaus auch die notwendigen Pyrometer vor und hinter dem Booster-Induktor platziert werden. Insgesamt wird das Booster-System aus dem eigentlichen Booster-Induktor, mehreren Pyrometern, einem entsprechenden Schwingkreis mit eigenem Umrichtermodul und der entsprechenden Regelungsstechnik bestehen.

VERBESSERUNGEN DURCH DAS BOOSTER-SYSTEM

Aufgrund der schnellen Reaktion des Boosters auf die gemessenen Temperaturschwankungen wird das System in der Lage sein, die Temperaturschwankungen über die Länge des Rohrs erheblich zu reduzieren und darüber hinaus auch die Schwankungen von Rohr zu Rohr auszugleichen.

Die erwartete Verbesserung der Temperaturschwankungen, basierend auf Ist-Werten bestehender Anlagen zeigt **Bild 7**. Die Temperaturschwankungen basierend auf unterschiedlichen Wandstärken über den Rohrumfang können durch dieses System nicht beeinflusst werden und sind weiterhin sichtbar, die Temperaturgleichmäßigkeit in Längsrichtung wird jedoch signifikant verbessert.

FAZIT

Ein Booster-System ermöglicht den automatischen Aus-

gleich von Temperaturschwankungen in Längsrichtung unabhängig vom vorher gewählten Verfahrensrezept. Daraus resultiert eine Verringerung der Temperaturschwankungen in Längsrichtung, von Rohr zu Rohr und bei angestauchten Rohren (Upset Ends) um bis zu 50 K mit einer hohen örtlichen Auflösung. Dafür ist neben einer hohen Heizleistungsdichte des Booster-Induktors auch ein entsprechendes Design des zugehörigen Schwingkreises erforderlich.

LITERATUR

- [1] American Petroleum Institute: ANSI/API 5L specification for line pipe. Forty-Fourth Edition, Washington USA, 2008, S. 36
- [2] American Petroleum Institute: API 5CT specification for casing and tubing. Ninth Edition, Washington USA, 2012, S. 29-32

AUTOREN



Dr.-Ing. **Markus Langejürgen**
SMS Elotherm GmbH
Remscheid
Tel.: 02191 / 891-218
m.langejuergen@sms-elotherm.com



M.Sc. **Christian Vogt**
SMS Elotherm GmbH
Remscheid
Tel.: 02191 / 891-219
c.vogt@sms-elotherm.com



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



Helmut Kramer
SMS Elotherm GmbH
Remscheid
Tel.: 02191 / 891-250
h.kramer@sms-elotherm.com



M.Sc. **René Harjes**
SMS Elotherm GmbH
Remscheid
Tel.: 02191 / 891-402
r.harjes@sms-elotherm.com