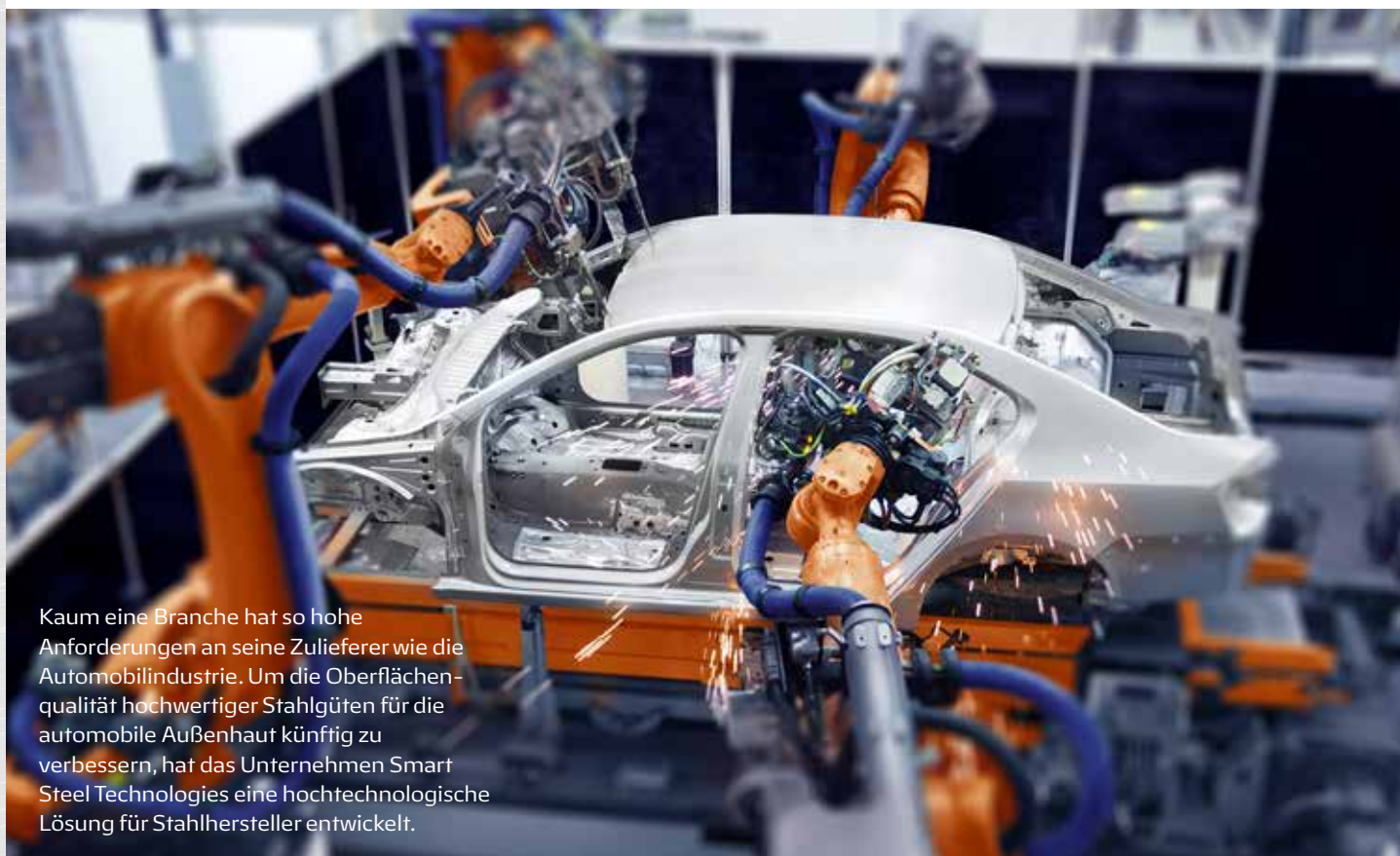


# OPTIMALE OBERFLÄCHEN- QUALITÄT BEI HOCHWERTIGEM STAHLGÜTEN

Dauerhafte Reduktion von Schalenbildung auf Stählen für automobiler Außenhaut durch den Einsatz von Technologien der künstlichen Intelligenz



Kaum eine Branche hat so hohe Anforderungen an seine Zulieferer wie die Automobilindustrie. Um die Oberflächenqualität hochwertiger Stahlgüten für die automobiler Außenhaut künftig zu verbessern, hat das Unternehmen Smart Steel Technologies eine hochtechnologische Lösung für Stahlhersteller entwickelt.

**AUTOR:** Dr. Falk-Florian Henrich, Gründer und Geschäftsführer, Smart Steel Technologies, Berlin

**DARUM GEHT'S:** In der Stahlindustrie wurde erstmals eine substanzielle Verbesserung der Oberflächenqualität von Stahlgütern für automobiler Außenhaut erreicht. Im Mittelpunkt dessen stand eine präzise Prozesssteuerung mittels künstlicher Intelligenz (KI) und Technologien des maschinellen Lernens (ML). Dem Unternehmen Smart Steel Technologies (SST) ist es gelungen, nicht nur die Oberflächenqualität vorherzusagen, sondern für jede Gießsequenz, Schmelze und Bramme vollautomatisch optimale Gieß- und Schmelzeinstellungen zu berechnen.

Die Optimierung der Oberflächenqualität von Sorten mit extrem niedrigem Kohlenstoffgehalt und IF-Stahl ist eine zentrale Zielsetzung in der Flachstahlproduktion. Die grundlegenden Ursachen für die Entstehung von Schalendefekten sind allgemein bekannt. Jeder Prozessschritt, vom Konverter bis hin zur Feuerverzinkung, wurde über Jahrzehnte hinweg kontinuierlich optimiert.

Dennoch haben alle Flachstahlhersteller nach wie vor mit Abweichungen im Strangguss zu kämpfen, die zu Oberflächenfehlern bei Gütern für automobiler Außenhaut führen. Erst spät in der Prozesskette sichtbar werdende Oberflächenfehler führen aufgrund der aufwändigen Bearbeitungsschritte speziell bei qualitativ hochwertigen Tiefziehgütern zu teuren Abwertungen. Einige Stahlhersteller schreiben strenge Vorschriften für die Reparatur von Brammen für bestimmte Stahlsorten vor, um nachgelagerte Qualitätsabweichungen zu verringern. Jedoch entstehen hierdurch zusätzliche Energiekosten, da die Brammen zur Nachbearbeitung abgekühlt und nicht im Heißeinsatz durch die Warmbreitbandstraße gefahren werden können.

Üblicherweise werden für die Abwertung von Brammen regelbasierte Prognosemodelle verwendet. Wenn während des Gießprozesses bestimmte Schwellenwerte nicht eingehalten werden, erfolgt eine Abwertung der Bramme sowie deren Umwidmung auf einen Auftrag mit geringeren Qualitätsansprüchen. Diese Schwellenwerte werden basierend auf

## SST Centralized Coil Map

Oberflächeninspektionsergebnisse werden positionsgenau aufeinander abgebildet

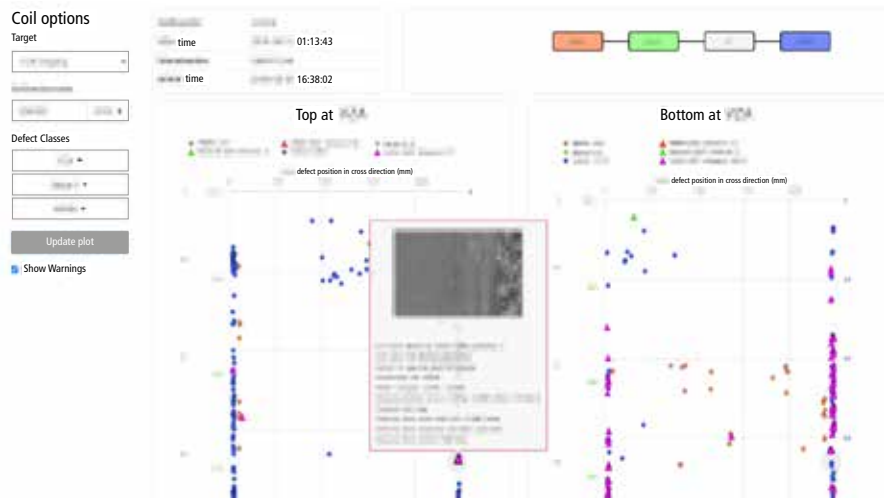


Abbildung 1: SST Centralized Coil Map ordnet sämtliche Oberflächeninspektionsergebnisse von Warmwalzwerken, Beizen, Verzinkungsanlagen präzise zu.

Erfahrungswerten festgelegt und das System der Brammenabwertung berücksichtigt nicht die tatsächlich beobachtete Oberflächenqualität der gesamten Prozesskette bis zur Verzinkung.

Insbesondere unterstützt keines der vorhandenen Systeme der Stahlhersteller bei der Optimierung des Gießprozesses auf Grundlage der tatsächlichen Oberflächenqualität. Die Fehlerklassifizierung mithilfe automatisierter Oberflächeninspektionssysteme ist bekanntermaßen unzuverlässig, sodass die Stahlhersteller mit verzerrten Qualitätszielsignalen umgehen müssen. Zweitens können Stahlhersteller detektierte Fehler auf der Oberfläche des gewalzten oder verzinkten Bandes nicht automatisch auf die exakte Strangposition während des Gießens zurückverfolgen, da die bestehenden Systeme nicht alle Schritte der Bandmanipulation entlang der Prozesskette (Schneiden, Schöpfen, Auf- und Abwickeln, Schweißvorgänge, Besäumen) präzise zurückrechnen.

Während die physikalischen Mechanismen, die zu Defekten führen, allgemein bekannt sind, können die Stahlhersteller nicht nachvollziehen, welche kausalen Zusammenhänge zu einem bestimmten Zeitpunkt während des Gießens gewirkt und tatsächlich einen Defekt an einer bestimmten Position auf einem bestimmten Produkt verursacht

haben. Eines von vielen Beispielen sind Schwankungen des Gießspiegels. Diese können zu eingeschlossenem Gießpulver führen, das nach dem Walzen als Schalendefekt an der Oberfläche erscheint. Die Kernfrage ist, wie die eigentliche Ursache der Schwankungen des Gießspiegels ermittelt und behoben werden kann. Die Liste potenzieller Ursachen ist lang und umfasst unter anderem operative Faktoren der Gießmaschine und des Schmelzbetriebs, chemische Parameter des Stahls, Zeitabläufe sowie die Temperatur.

### Fertigungsplan dient als Basis zur Optimierung

Smart Steel Technologies hat ein Softwaresystem entwickelt, das sämtliche oben beschriebene Herausforderungen löst und vollautomatisch einen kompletten Satz optimaler Einstellungen für alle relevanten Gieß- und Schmelzparameter berechnet, um jegliche Oberflächenfehler, die durch den Gießprozess auftreten, zu minimieren. Während der Sequenzplanung vor dem Gießbeginn nimmt SST den Fertigungsplan des Stahlherstellers als Input und gibt automatisch einen optimierten Plan aus. Die Optimierung aller Gieß- und Schmelzeinstellungen erfolgt anhand der gesamten Sequenz, für jede einzelne Schmelze und für jede einzelne Bramme. Das op-



timierte Planungssystem wird durch Online-Module ergänzt, welche die Bediener des Gieß- und Sekundärmetallurgie-Prozesses dabei unterstützen, höchste Präzision zu erzielen und sämtliche Prozessabweichungen zu minimieren.

Das System von SST reduziert die Rate der Oberflächendefekte durch die Beseitigung ihrer Ursachen erheblich. Als Nebenprodukt ist die Vorhersage der Oberflächenqualität ebenfalls inbegriffen. Dieses System wurde in der Produktion bei einem der fortschrittlichsten Flachstahlhersteller Deutschlands implementiert und erfolgreich erprobt. Weitere Implementierungen werden derzeit durchgeführt. Die durchschnittliche Projektlaufzeit beträgt sechs Monate.

### Schritt 1: Lösung des Oberflächeninspektionsproblems

Die Klassifikationsgenauigkeit von Oberflächeninspektionssystemen (OIS), welche in der Stahlherstellung eingesetzt werden, ist zu gering, um für die Erstellung von Zielsignalen zur Prozessoptimierung genutzt zu werden. Bei den meisten komplexen Oberflächendefekten, z.B. bei Schalendefekten, treten große Diskrepanzen zwischen den Ergebnissen der manuellen Inspektion und den Ergebnissen automatisierter Oberflächeninspektionssysteme auf.

Darüber hinaus müssen der Schweregrad der Oberflächendefekte und die Verlässlichkeit der Defektklassifikation berücksichtigt werden.

Daher verwendet SST nur die Detektion (Position, Größe, Bild), nicht aber die Klassifizierung (durch OIS ermittelter Defekttyp). Diese Quelldaten, bestehend aus Millionen von Oberflächendefektbildern und zugehörigen Metadaten, durchlaufen moderne Bildklassifikatoren, die auf proprietärer Deep-Learning-Technologie basieren, um zu entschei-

## SST Casting Optimizer - Visualisierung

Prozess- und Oberflächeninspektionsdaten werden metergenau zusammengeführt

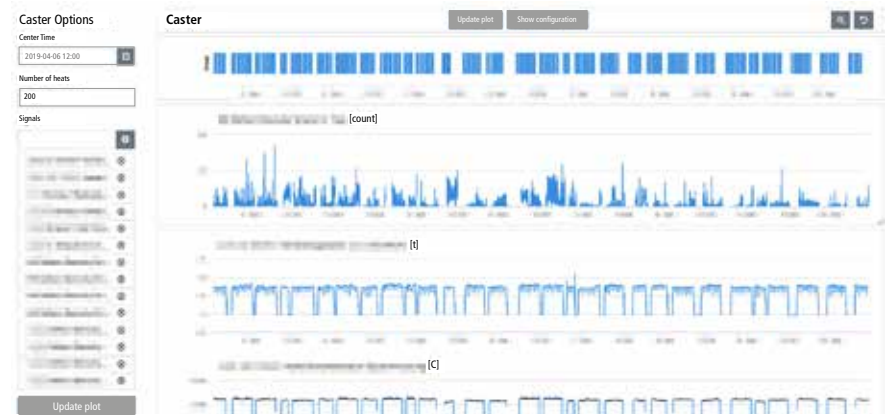


Abbildung 2: Bedienoberfläche zur Prüfung zusammengeführter Daten aus Schmelzbetrieb, Strangguss, Oberflächeninspektion

## SST Casting Optimizer – Explainable AI

Automatische Berechnung optimaler Parameterkombinationen

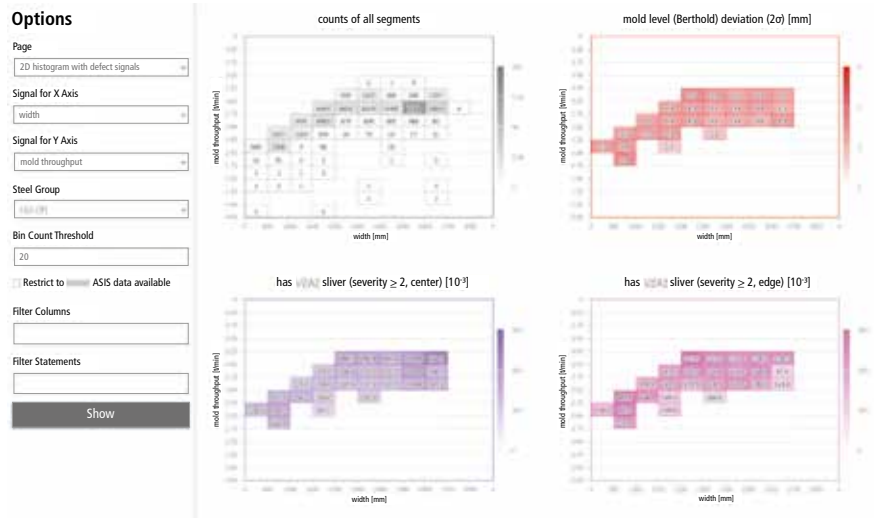


Abbildung 3: Analyse der Qualitätsauswirkungen verschiedener Parameterkombinationen



den, welches Oberflächenbild eine Schale oder bestimmte andere Defekttypen zeigt. SST bietet Oberflächenfehlerklassifikatoren für jeden Schritt der Stahlherstellung an. Eine Deep-Network-Architektur wurde gezielt für Warmbandbilder entwickelt, ein zweites Deep Network gezielt für Bilder des gebeizten Bandes, ein drittes Deep Network gezielt für Bilder des verzinkten Bandes. Jeder Klassifikator wird auf die jeweilige Produktionslinie abgestimmt.

Nach der Einführung zuverlässiger Defektklassifikatoren an Warmwalzwerk, Beize und Verzinkungsanlagen werden alle vorhandenen historischen Oberflächenbilder mit dieser neuen Technologie klassifiziert. Daraus ergeben sich zuverlässige individuelle Zielsignale. Diese sind jedoch für eine umfassende Ursachenanalyse immer noch unzureichend, da die anlagenübergreifenden Auswirkungen vernachlässigt werden, solange jeder Prozessschritt separat behandelt wird.

Aus diesem Grund wird ein globaler Defektklassifikator eingesetzt, der die Ergebnisse der Oberflächeninspektion aus allen Produktionsstufen zusammenführt. Der entscheidende Punkt ist eine präzise positionsabhängige Zuordnung jedes einzelnen Oberflächenfehlers vom Warmwalzen bis zum Verzinken. Um die richtigen Positionen zu finden, gilt es nicht nur, Brammen warmgewalzten, kaltgewalzten und verzinkten Coils zuzuordnen. Die exakte anlagenübergrei-

fende Positionierung der Defekte erfordert die Berücksichtigung jeglicher Bandmanipulation, jedes optionalen Zusatzschrittes auf allen möglichen Produktionswegen und jeder Station, an der zugeschnitten, abgeschnitten, besäumt oder geschweißt wird.

Alle Oberflächeninspektionsbilder von Warmwalz-, Beiz- und Verzinkungslinien werden online klassifiziert und in der in Abbildung 1 abgebildeten SST Centralized Coil Map erfasst.

### Schritt 2: Optimierung des Stranggießprozesses

Basierend auf den SST-eigenen Oberflächendefektklassifikatoren und der prozessübergreifenden Positionsmatching-Technologie wird das Oberflächenqualitätssignal, d.h. die Fehlerrate pro Meter Band, exakt auf Gießzeit und Strangposition zurückgerechnet. Oberflächenfehler werden den exakten Strangpositionen automatisch zugeordnet. Hierbei werden auch alle Manipulationen des gegossenen Strangs, Nacharbeit an den Brammen sowie die variable Gießgeschwindigkeit berücksichtigt.

Zeitgleich führt die Software von SST automatisch die Oberflächenfehlerraten mit allen Level-1-Gießsignalen wie Gießgeschwindigkeit, Verteilertemperatur, Kühlwasserströmen und vielen weiteren zusammen. Moderne Gießmaschinen liefern typischerweise um die 8 000 Rohsignale in unterschiedlichen Takt-

frequenzen von 0,5 Hz bis zu 50 Hz. Während herkömmliche Systeme oft nur Durchschnittswerte der Prozessparameter berücksichtigen, analysiert SST die tatsächlichen hochaufgelösten Zeitreihen. Diese Vorgehensweise ist unerlässlich, da kurze Signalspitzen (z.B. Abweichungen des Gießspiegels) wertvolle Informationen enthalten. Die eigentlichen Level-2-Daten der Stranggießanlage und des Schmelzbetriebs (BOF/EAF, LF, RH) werden ebenfalls zusammengeführt. Selbiges gilt für die Daten der Brammenendfertigung (Informationen zum Schleifen und Flämmen).

SST liefert ebenfalls Visualisierungstools zur einfachen manuellen Überprüfung der zusammengeführten und transformierten Daten, wie in Abbildung 2 dargestellt.

Allerdings sind die Signal-Rohdaten der Gießmaschine nur von begrenztem Nutzen. Daher extrahiert die Software aus jedem relevanten Gießsignal automatisiert aussagekräftige Merkmale. Ein Gießgeschwindigkeitssignal muss zum Beispiel in einzelne Störungstypen zerlegt werden: manuelle Geschwindigkeitsänderungen, automatische Notbremsungen, charakteristische Geschwindigkeitsmuster. Zur vollständigen Automatisierung des Prozesses der Extraktion von Informationen enthält die Software spezifische Module zur Merkmalsextraktion für zahlreiche Gruppen von Gießsignalen.

## SST Casting Optimizer – Optimierte Gießsequenzen

Live-Integration in das Produktionsplanungssystem

### Sequence Options

Sequence ID

19752

Optimize

Optimization Settings

Start	Heat	Strand	Length	Width	Speed	RH Exit	SEN Min	SEN Max	MCW BSF	MCW BSL	SCW ZO	B Torque	UB Torque	Defect Red.
23:10	9	1	1118	1410	12	1218	100	110	1400	1400	1287	11	11	1%
23:17	9	1	1118	1410	12	1218	100	110	1400	1400	1287	11	11	1%
23:24	9	1	1118	1410	12	1218	100	110	1400	1400	1287	11	11	1%
23:34	10	1	1118	1410	12	1218	100	110	1400	1400	1287	11	11	1%
23:43	10	1	1118	1410	12	1218	100	110	1400	1400	1287	11	11	1%
23:52	10	1	1118	1410	12	1218	100	110	1400	1400	1287	11	11	1%
00:01	10	1	1118	1410	12	1218	100	110	1400	1400	1287	11	11	1%
00:12	10	1	1118	1410	12	1218	100	110	1400	1400	1287	11	11	1%

Abbildung 4: Automatisierte Parameteroptimierung für jede Gießsequenz



Der Prozessstatus der Stranggießanlage zum Gießzeitpunkt  $t_0$  ist nun durch alle Messdaten und Einstellwerte der relevanten Prozessschritte innerhalb des Gießzeitintervalls  $[t_\alpha, t_\beta]$  mit  $t_0 \in [t_\alpha, t_\beta]$  gegeben.

Das Zeitintervall ist ausreichend groß gewählt, um zeitliche Zusammenhänge abzudecken, z.B. Zeitabläufe einer Folge von Schmelzen, Pfannenwechsel, Verteilerwechsel, Sortenwechsel, nicht-stationäre Zustände. Neben der Gießmaschine gehören auch die vorgelagerten Schritte, deren Prozesszustand die Stranggießanlage beeinflusst, zu den relevanten Prozessstufen, z.B. Stahlerzeugung im Konverter bzw. Elektrolichtbogenofen, Sekundärmetallurgie mit Pfannenofen und Vakuumbehandlung. Feinste Abweichungen in Zeit, Temperatur, metallurgischer Behandlung können sich zu Einflüssen aufsummieren, die zu Abweichungen beim Gießen führen und Schalen sowie andere Oberflächenfehler verursachen können. Abhängig von der Verknüpfung zwischen

Gießanlage und Warmbandstraße (Heiß-einsatz, Dünnbrammengießen, -walzen) können auch Störungen des Warmwalzprozesses zu Irregularitäten im Stranggießprozess führen.

Basierend auf der oben beschriebenen Extraktion von Informationen bietet Smart Steel Technologies kein Black-Box-System an, sondern ermöglicht es den Technologen, den Konfigurationsraum der Stranggießanlage direkt zu inspizieren. Der Software-Anwender kann, wie in Abbildung 3 dargestellt, beliebige Kombinationen von Gieß- und Schmelzparametern, Stahlsorten sowie Produktionsdaten auswählen und deren Auswirkungen auf die Oberflächenqualität untersuchen.

Das entscheidende Kernmerkmal der Software ist jedoch, auf der Grundlage permanent aktualisierter Live-Daten sowie der Gesamtmenge der historischen Produktionsdaten die optimale Kombination von Gieß- und Schmelzparametern hinsichtlich der Oberflächenquali-

tät algorithmisch zu ermitteln. Der Optimizer berücksichtigt alle relevanten Beschränkungen im Prozess und führt im hochdimensionalen Konfigurationsraum der Anlage eine multivariate Optimierung durch. Dabei kombiniert Smart Steel Technologies die deterministische, physikalische und metallurgische Modellierung des Gießprozesses mit probabilistischer Modellierung auf Basis von Methoden der künstlichen Intelligenz und des maschinellen Lernens.

Durch die Live-Integration mit dem Produktionsplanungssystem und dem MES von Schmelzbetrieb und Gießanlage wird für jede Produktionssequenz automatisch ein optimierter Sequenzplan berechnet, siehe Abbildung 4.

Darüber hinaus unterstützt die Live-Modellausgabe die Bediener sowohl der Gießanlage als auch der Sekundärmetallurgie mit Live-Empfehlungen für Einstellungen, um höchste Präzision in der Prozesssteuerung zu erzielen. ■

 **STAHLEISEN**

# Der Schlüssel zum Erfolg

Das Lieferantenverzeichnis der Stahlindustrie in neuer Auflage

- Aktuelle Übersicht an internationalen Lieferkontakten bei 27 Kategorien und 120 Rubriken
- Führendes Nachschlagewerk für Produzenten aus der Eisen- und Stahl-, Zulieferer- und weiterverarbeitenden Industrie

Druckauflage fast vergriffen. Käufer unter [www.stahleisen.de/shop](http://www.stahleisen.de/shop) erhalten zu jeder Bestellung noch ein Exemplar



scan mich

 **maerken**  
kommunikation

Siehe auch: [www.stahleisen.de/nachschlagewerke](http://www.stahleisen.de/nachschlagewerke)

