

Beitrag zur Qualitätsverbesserung von Gießwalzdraht aus Kupfer durch Einsatz eines inline-Druckentzunderungssystems

Olaf Schwedler, Hendrik Busch

KME Mansfeld GmbH; Lichtlöcherberg 40, 06333 Hettstedt

Schlagwörter: Gießwalzdraht, Drahtqualität, abrasive Entzunderung, Zunder, Kupferoxid

1 Einleitung

Gießwalzdrähte (GWD) aus Kupfer sind ein Vorprodukt für die Herstellung von Drähten, Litzen und Seilen, aber auch für Rund- und Flachlackdrähte. Bei der Herstellung von GWD wird die Produktqualität überwacht, die in die Erfüllung geometrischer Ansprüche, in die Beschaffenheit der Oberfläche bzw. oberflächennahe Qualitätskriterien (Zundereinschlüsse, Risse, Einwalzungen) und auch die Eigenschaften, die sich durch die chemische Zusammensetzung ergeben eingeteilt werden können.

Die chemische Zusammensetzung und daraus resultierend mechanischen Eigenschaften und die elektrische Leitfähigkeit hängen in starkem Maße von der Qualität der eingesetzten Ausgangsmaterialien und somit von den Kathoden und Schrotten ab. Die Maßhaltigkeit des Drahtes wiederum hängt von den Walzkalibern und Walzenzuständen, ebenso aber auch von der Beschaffenheit der Walzemulsion ab. Kupfer(II)-oxid (weitläufig als Zunder bezeichnet) entsteht durch den Kontakt des heißen Kupferstranges mit Luftsauerstoff. Solche festen Partikel werden in der folgenden Walzverarbeitung unter die Oberfläche des umgeformten Stranges eingewalzt und sorgen so für ein Qualitätsdefizit des GWD.

Die erreichbare Drahtqualität hat maßgeblich Einfluss auf die Möglichkeiten der Weiterverarbeitung dieser Drähte. Als Vorprodukt für Flachlackdraht beispielsweise, ist GWD mit absoluter Zunderfreiheit erforderlich. Zum Einem könnte das Hausfallen des spröden Zunders aus dem Draht bei finalen Zieh- oder Walzstufen zu Riefen führen, die anschließend umformtechnisch nicht mehr zu eliminieren sind. Ebenso könnten sich lacküberzogenen Zunderpartikel vom Draht lösen und so zu einem erhöhten Risiko für Spannungsdurchschläge führen.

In dem Beitrag wird für eine großtechnisch arbeitende Kupfergießwalzdrahtanlage die Möglichkeit beleuchtet, den auf der heißen Gießstrangoberfläche entstehenden Zunder vor Einlauf in das Walzwerk zu entfernen. Hierzu wird ein auf einen sehr hohen Druck komprimiertes Medium ($p = 1.150 \text{ bar}$) genutzt, um den Zunder auf dem erstarrten Gießstrang im laufenden Fertigungsprozess abrasiv zu entfernen.

2 Gießwalzdraht aus Kupfer

Lackdrähte sind Rund- oder Flachdrähte aus Kupfer und Aluminium, deren elektrischer Isolationsschutz aus bis zu 30 Schichten Lack bestehen. Diese Lacke werden nach dem Ziehen (Rundlackdrähte) bzw. Walzen (Flachlackdrähte) des Vordrahtes aufgetragen und unter Wärme ausgehärtet. Die qualitative Bewertung der Lackdrähte erfolgt unter Berücksichtigung der elektrischen, thermischen, mechanischen und chemischen Beanspruchung. Häufig wird die Oberfläche des Lackdrahts gewachst, um so die Gleitfähigkeit zwischen den einzelnen Drahtlagen zu erhöhen. Eine Übersicht über die Prozessschritte enthält Abbildung 1.

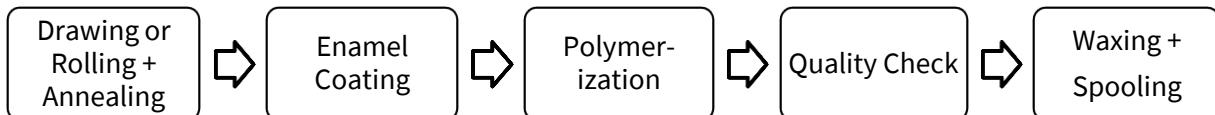


Abbildung 1: Prozessfolge für die Herstellung von Lackdraht

Dadurch, dass die Lackschichten sehr dünn sind, sind Lackdrähte hervorragend wickelfähig und werden demzufolge häufig auch als Wickeldrähte bezeichnet. Zum einen verfügen die Drähte über eine gute elektrische Leitfähigkeit, zum anderen sind hervorragende elektrische Isolationseigenschaften durch die Lackschichten zu gewährleisten, um so Kurzschlüssen zwischen Wickellagen zu verhindern. Wickeldrähte finden in Elektromotoren, Generatoren, Transformatoren oder elektrischen Messgeräten Verwendung.

Die zunehmende Bedeutung von Lackdraht ist in Abbildung 2 exemplarisch für den europäischen Automobilsektor wiedergegeben. Demnach hat sich die Nachfrage zwischen 2006 bis 2017, also in elf Jahren, nahezu verdoppelt.

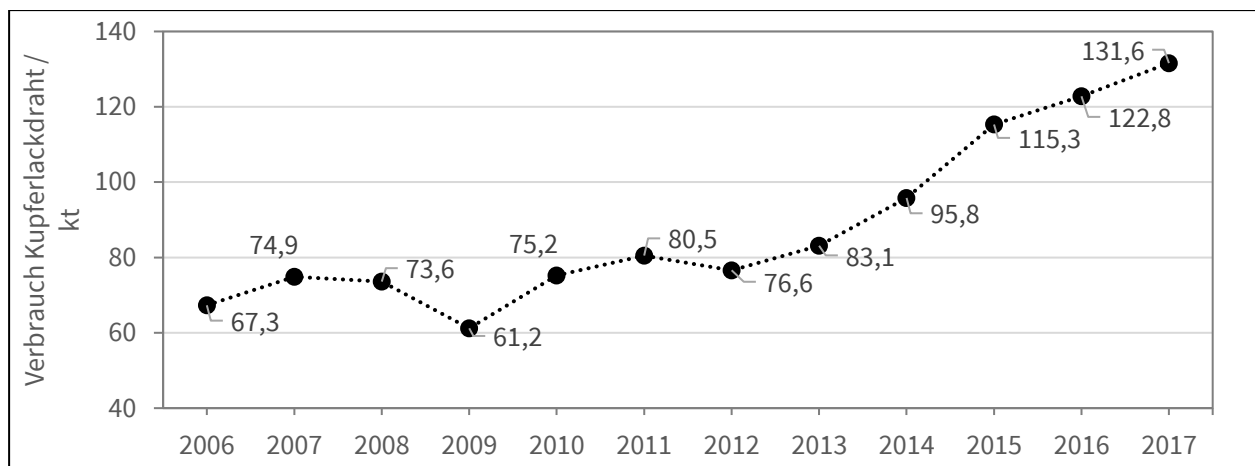


Abbildung 2: Lackdrahtbedarf der europäischen Automobilindustrie 2006-2017 (Quelle: Cu2 Consulting)

O. Schwedler, H. Busch: Beitrag zur Qualitätsverbesserung von Gießwalzdraht aus Kupfer durch Einsatz eines inline-Hochdruckentzunderungssystems

S. 2/22

02/2023

Verlag Meisenbach GmbH, Geisfelder Straße 14
96050 Bamberg/Deutschland

www.umformtechnik.net/whitepaper/

Für die Herstellung von Lackdraht sind im Wesentlichen Vormaterialien wie Kupferdraht und Lacke erforderlich. Im Fortlauf der Arbeit steht Kupferdraht im Vordergrund, der von der Halbzeug-Industrie in Form von Gießwalzdraht zur Verfügung gestellt wird.

Die Herstellung von Lackdraht mit der Gewährleistung der geforderten Ansprüche an solche Drähte stellt gleichzeitig hohe Anforderungen an die Vordrahtqualität des Gießwalzdrahtes. In Abhängigkeit vom geometrischen Endquerschnitt des Lackdrahtes werden runde Drähte durch eine Reihe von Ziehsteinen bis auf den gewünschten Enddurchmesser gezogen. Flachlackdrähte hingegen werden bis auf die geforderte Enddicke in mehreren Stufen gewalzt.

Die Ziehfähigkeit von Gießwalzdraht aus Kupfer hängt nach [1, 2] im Wesentlichen von der Duktilität und von der Oberflächenbeschaffenheit des Drahtes ab. Diese Anforderungen an die Fehlerfreiheit hat genauso Gültigkeit für gewalzte Drähte. In Tabelle 1 ist eine Einteilung von Qualitätskriterien für Gießwalzdrähte vorgenommen worden, deren Beachtung bei der anschließenden Herstellung von Lackdraht fundamental ist. Eine weitaus umfangreichere Übersicht über Drahtfehler, deren Ursache und Beseitigung umfasst [3]. Im weiteren Verlauf der vorliegenden Veröffentlichung wird insbesondere die Zunderbildung und -reduktion im Gießwalzdraht weiter untersucht

Tabelle 1: Qualitätskriterien für Gießwalzdraht (Auswahl)

innere, die Duktilität betreffende Qualitätskriterien	Qualitätskriterien der Drahtoberfläche bzw. des oberflächennahen Bereiches
Sauerstoffanteil/-verteilung Begleitelemente Porosität Gefüge/Korngröße	Mechanische Beschädigungen wie Risse und Ein-/Überwalzungen Kupferoxid (Zunder) Flitteranhaftungen

2.1 Die Herstellung von Gießwalzdraht aus Kupfer

Zur kontinuierlichen Herstellung von Gießwalzdraht aus Kupfer wurde bei KME eine großtechnische Anlage, die nach dem Contirod®-Verfahren arbeitet eingesetzt [4, 5]. Dieses Verfahrenskonzept, welches schematisch in Abbildung 3 wiedergegeben ist, wurde erstmalig Anfang der 1970er Jahre erfolgreich zur Drahtherstellung eingesetzt. [6] Aus fertigungstechnischer Sicht erfolgt zunächst Urformen mit definierter Kokille. Noch aus der Erstarrungswäre erfolgt ein Umformprozess, das Kaliberwalzen.

Als Ausgangsmaterial für den Fertigungsprozess kommen sog. Kathoden, also elektrolytisch abgeschiedenes und demzufolge sehr reines Kupfer zum Einsatz. Sie werden in einem erdgasbeheizten Schachtschmelzofen eingeschmolzen. Dieser Ofen hat eine Schmelzleistung von bis zu 32 Tonnen Kupfer pro Stunde. Von dem Schmelzofen wird das überhitzte Metall über eine erdgasbeheizte Rinne in den Abschlackofen überführt und versorgt dann den Speicherofen

O. Schwedler, H. Busch: Beitrag zur Qualitätsverbesserung von Gießwalzdraht aus Kupfer durch Einsatz eines inline-Hochdruckentzunderungssystems

S. 3/22

02/2023

Verlag Meisenbach GmbH, Geisfelder Straße 14
96050 Bamberg/Deutschland

www.umformtechnik.net/whitepaper/

(Kapazität bis zu 40 t Kupfer) mit Flüssigkupfer. Der Speicherofen dient als Puffer zwischen der zugeführten (Kathoden) und der abgenommenen Kupfermenge (Draht). Der folgende Vergießofen dosiert die zu vergießende Kupfermenge, die über den Tundish die Gießmaschine füllt. Die Gießmaschine (Twinbelt-Caster) besteht im Wesentlichen aus zwei umlaufenden wassergekühlten Stahlbändern, die die Ober- und Unterseite der Kokille für das erstarrende Kupfer bilden. Die Seitenbegrenzungen der Gießform werden durch Dammblockketten, die aus einer Kupferlegierung bestehen, gewährleistet. Die Gießgeschwindigkeit ist abhängig von der Gießband-/Kettengeschwindigkeit und kann zwischen 9,6 und 11,0 m/min betragen. In der Gießmaschine ist das Urformen abgeschlossen, es bildet sich ein endloser Kupferstrang mit einem rechteckigen Querschnitt (90,0 x 60,0 mm²). Dieser Strang durchläuft im Anschluss einen weiteren mit Sprühwasser kühlenden Bereich (Sekundärkühlung), eine Strangschere für den Harvariefall und eine Fräsvorrichtung. Vier mit Wendeschneidplatten bestückte Kantenfräser brechen die Strangkanten, um einen gratfreien Einlauf des Stranges in das Vorwalzwerk sicherzustellen. Mit Erreichen des ersten Walzenpaares beginnt die Umformung durch Kaliberwalzen. Hierzu sind in dem Vorwalzwerk fünf und im Fertigwalzwerk sieben Walzenpaare, somit 12 Walzgerüste abwechselnd orthogonal versetzt angeordnet. In Abhängigkeit von der ausgewählten Kalibrierung können auf der Anlage Gießwalzdrähte mit unterschiedlichen Durchmessern hergestellt werden. Jedes Walzwerk verfügt über einen separaten Walzemulsionskreislauf, wodurch die Zusammensetzung des jeweiligen Kühlschmierstoffs den tribologischen Anforderungen entsprechend angepasst werden kann.

Nach Beendigung der Formgebung durchläuft der Draht eine Kühlstrecke, in einem Wasser-Ethanol-Gemisch wird er auf eine Temperatur unter 60 °C abgekühlt. In einem Windungsleger mit rotierendem Legerohr werden Drahtcoils mit einem Gewicht von bis zu fünf Tonnen produziert, die anschließend in einer Folienschumpfanlage verpackt und einem definierten Lagerplatz zugeführt werden.

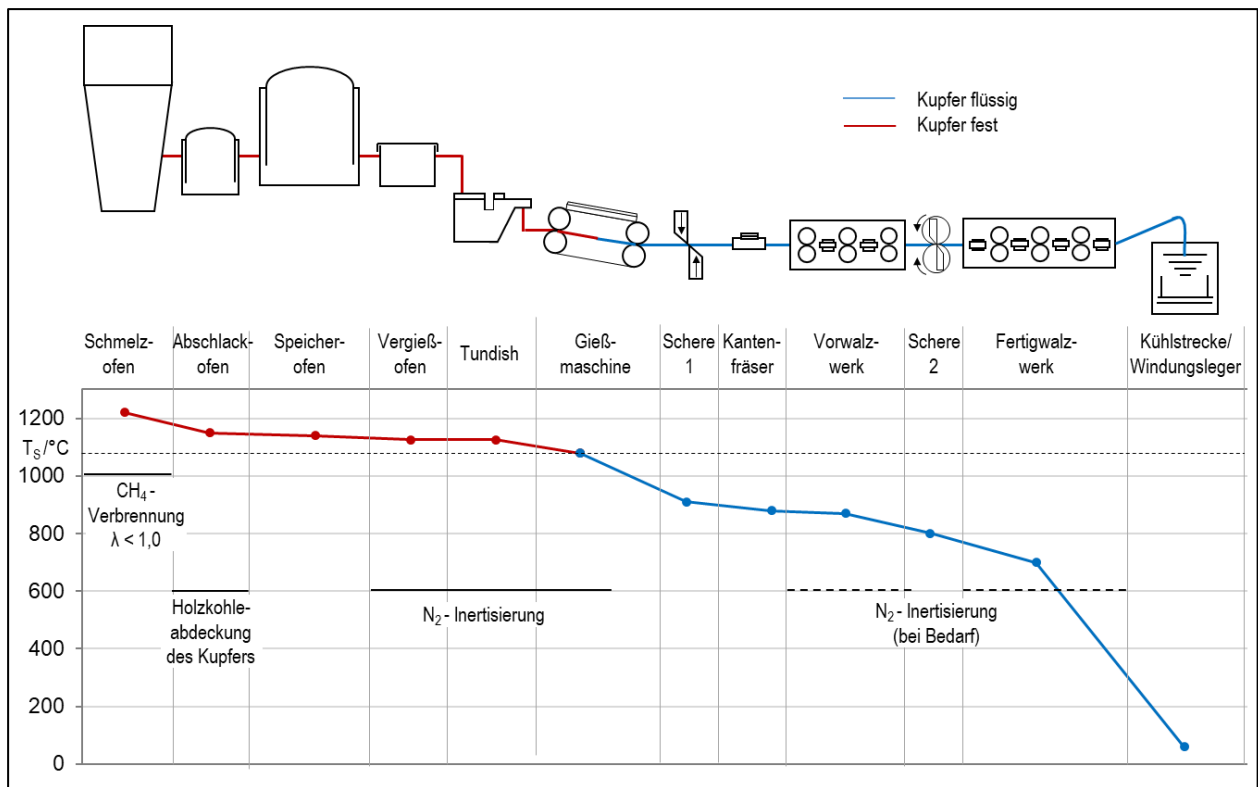


Abbildung 3: Schematischer Aufbau einer Contirod®-Anlage zur Herstellung von GWD aus Kupfer mit Temperaturbereichen und Möglichkeiten der Inertisierung

2.2 Die qualitative Bewertung von Gießwalzdraht

Zur Gewährleistung einer fortwährenden qualitativ hochwertigen Gießwalzdrahtproduktion werden vor und während des Herstellprozess und abschließend im fertigen Halbzeug verschiedene Methoden zur Qualitätsbewertung genutzt. Bedingt durch die kontinuierliche Herstellung, der der Produktion von Gießwalzdraht unterliegt, können Drahtproben nicht beliebig, sondern am Drahtcoilanfang oder -ende entnommen werden. Hieraus ableitbar ist eine Begrenztheit der statistischen Sicherheit bei der qualitativen Bewertung des Drahtes. Eine Übersicht über praktisch angewendete Qualitätsbewertungen beinhaltet Tabelle 2.

Tabelle 2: Wichtige Qualitätsbewertungsmethoden bei der GWD-Herstellung

Fertigungsfolge	Einsatzmaterial / Flüssigkopper	<ul style="list-style-type: none"> Bestimmung der chemischen Zusammensetzung von Kathoden und Schrotten permanente Messung des O₂-Gehalts im Flüssigkopper 	
	abgekühlter Gießwalzdraht vor dem Aufwickeln	Inline-Detektion mittels Wirbelstromprüfung von: <ul style="list-style-type: none"> Oberflächenfehlern auf dem Draht ferromagnetischen Drahteinschlüssen Durchmesserschwankungen des Drahtes 	
	abgekühlter Gießwalzdraht nach dem Aufwickeln/ Drahtprobe	„Innere“ Eigenschaften: <ul style="list-style-type: none"> chemische Zusammensetzung mechanische Eigenschaften (Zugversuch) elektrische Leitfähigkeit (Messbrücke) 	Oberflächen- bzw. oberflächennahe Beschaffenheit: <ul style="list-style-type: none"> Anzahl und Länge von Zunderpartikeln/-zeilen, Überwalzungen (Torsionstest) Anzahl und Überwalzungen von Zunderpartikeln (metallografische Längs-/Querschlitze)

2.3 Prozessbedingte Sauerstoffaufnahme und Kupferoxidbildung

Für die Einteilung der Kupfersorten hat die Sauerstoffkonzentration im erstarrten Kupfer grundlegende Bedeutung. Zur Charakterisierung sind neben Grenzwerten für Begleitelemente erlaubte Sauerstoffkonzentration einzuhalten und/oder das Bestehen des Wasserstoffversprödungstests nach DIN EN ISO 2626 nachzuweisen.

Im Allgemeinen ist die Löslichkeit von Sauerstoff im Kupfer eher gering. Das hat nach dem Erstarren zur Folge, dass sich um die inselförmigen reinen Kupferkörner netzförmige Strukturen aus eutektischem Kupfer(I)-oxid (Cu₂O) bilden. Nach [7] nehmen mit Zunahme des Cu₂O-Gehalts die elektrische Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit ab, ebenso wird das Umformvermögen des Werkstoffs, allerdings stark in Abhängigkeit vom Umformverfahren ungünstig beeinflusst. Auf der anderen Seite sind gewisse Sauerstoffkonzentrationen nicht zu unterschreiten. Nach [6] bspw. sollte der Sauerstoffgehalt zwischen 150 bis 160 µg/g betragen, darunter verringert sich Ziehfähigkeit des Drahtes. Die Löslichkeitsbeeinflussung von Wasserstoff in Abhängigkeit des Sauerstoffgehalts im flüssigen Kupfer wird von [8] beschrieben, bei Sauerstoffkonzentrationen von weniger als 200 µg/g in Flüssigkopper kann Wasserstoff einen rissigen Gießstrang verursachen [9]. Eine typische chemische Zusammensetzung von Gießwalzdraht bei KME beinhaltet Tabelle 3.

Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung des bei KME gefertigten Gießwalzdrahtes der Kupfersorte Cu-ETP1 (Angabe Cu in m-%, restl. Elemente in µg/g)

Cu	O ₂	Ag	As	Bi	Cd	Co	Cr	Fe	Mn	Ni	P	Pb	S	Sb	Se	Si	Sn	Te	Zn
99,98	155,0	13,0	0,2	0,8	0,2	0,2	0,2	3,0	-	6,0	0,1	1,5	6,4	0,3	0,5	1,0	0,3	0,3	1,1

Um die gewünschte Sauerstoffkonzentration im Gießwalzdraht sicherstellen zu können, werden entlang der Flüssigkupferstrecke unterschiedliche Maßnahmen getroffen. Zunächst wird das zum Aufschmelzen des Ausgangsmaterials verwendete Erdgas unterstöchiometrisch verbrannt. Dementsprechend steht etwas weniger Luft und folglich auch Sauerstoff für die vollständige Verbrennung des Erdgases zur Verfügung. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass es zu keiner Sauerstoffaufnahme durch das flüssige Kupfer kommen kann. Ebenfalls vor Luftsauerstoff wird das flüssige Kupfer durch Stickstoffinertisierung und Holzkohleabdeckungen geschützt. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, das flüssige Kupfer durch Spülen mit Kohlenmonoxid zu reduzieren.

Neben der Aufnahme von Sauerstoff im flüssigen Zustand, reagiert auch der erstarrte heiße Kupferstrang mit Sauerstoff. Nach Austritt des gerade erstarrten Kupferstranges aus der Gießmaschine befindet sich der glühende Kupferstrang auf einer Strecke von ca. zehn Metern an Luft und ist somit Sauerstoff ausgesetzt, bevor er mit einer Oberflächentemperatur von ca. 870 °C in das Vorwalzwerk geführt wird. In der Folge oxidiert das Kupfer über Cu₂O zu CuO [10, 11]. Im erkalteten Zustand des Kupferstranges ist eine festhaftende schwarz-gräuliche CuO-Schicht mit bloßem Auge zu erkennen und man spricht von Zunder [12]. Das Zunderwachstum und somit die Zunahme der Zunderschichtdicke auf dem Kupferstrang unterliegt dem parabolischen Oxidationsgesetz. Dieses werkstoffabhängige Zunderwachstumsgesetz nach WAGNER bedeutet, dass sich die Zunahme der Kupferoxidschichtdicke mit fortlaufender Zeit verlangsamt, aber nicht zum Stillstand kommt. Die Ausprägung der Zunderschicht ist demnach vom Werkstoff und dessen Oberflächenbeschaffenheit, vom Sauerstoffangebot, der Temperatur und der Verweildauer abhängig. [13, 14] Der parabolisch verlaufende zeitliche Zunderschichtdickenzunahme an Luft (c_{O₂} = 21%) ist in Abhängigkeit von der im konkreten Fall herrschenden Strangoberflächentemperaturen in Abbildung 4 wiedergegeben.

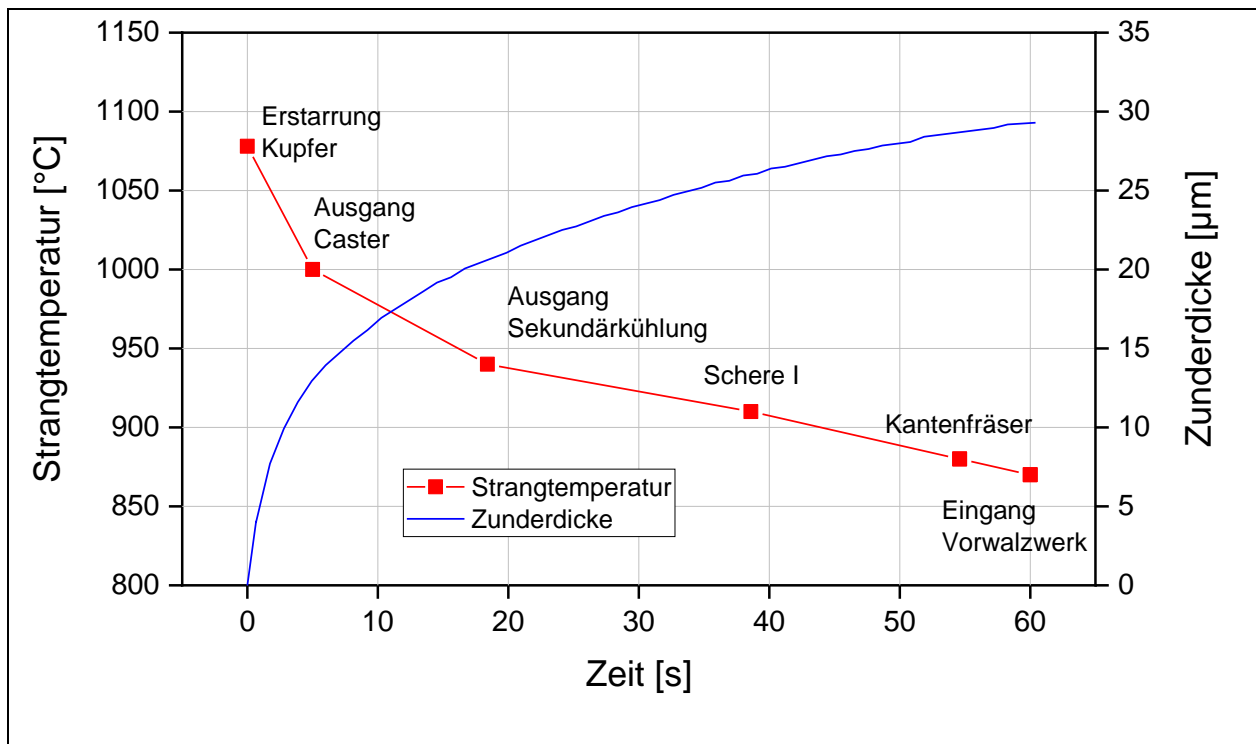


Abbildung 4: Temperaturabhängiges $\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}$ -Schichtdickenwachstum an Luft bei einer Strangeschwindigkeit von 10 m/min

Infolge der Verzunderung bildet sich auf der Oberfläche des Gießstranges ein $\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}$ -Belag mit einer Dicke bis zu 30 μm (Abbildung 5-links). Das Einlaufen des oberflächenverzundernten Gießstranges in das Vorwalzwerk hat zur Folge, dass bei den anschließenden Walzprozessstufen CuO -Partikel unter die Oberfläche gewalzt und mit zunehmender Walzstichfolge tiefer unter die Oberfläche des Walzgutes eingewalzt wird [2]. In Abbildung 5-rechts ist im metallografischen Querschliff eines GWD ein Zunderpartikel mit einer maximalen Tiefenausprägung von 90 μm abgebildet. Neben der Abnahme der weiteren Zieh- und Feinziehfähigkeit ist Gießwalzdraht mit Zundereinschlüssen für die Herstellung von Lackdraht nicht zulässig. Zunder, insbesondere in endgeometrienahen Umformstufen oder Stellen an denen der Zunder herausgeriebelt ist, können die Qualität der anschließenden Lackhaftung und Lackschichtdicke negativ beeinflussen. Eine defekte Lackschicht wiederum kann in diesen Drahtabschnitten bei elektrischem Stromfluss zu Kurzschlüssen führen.

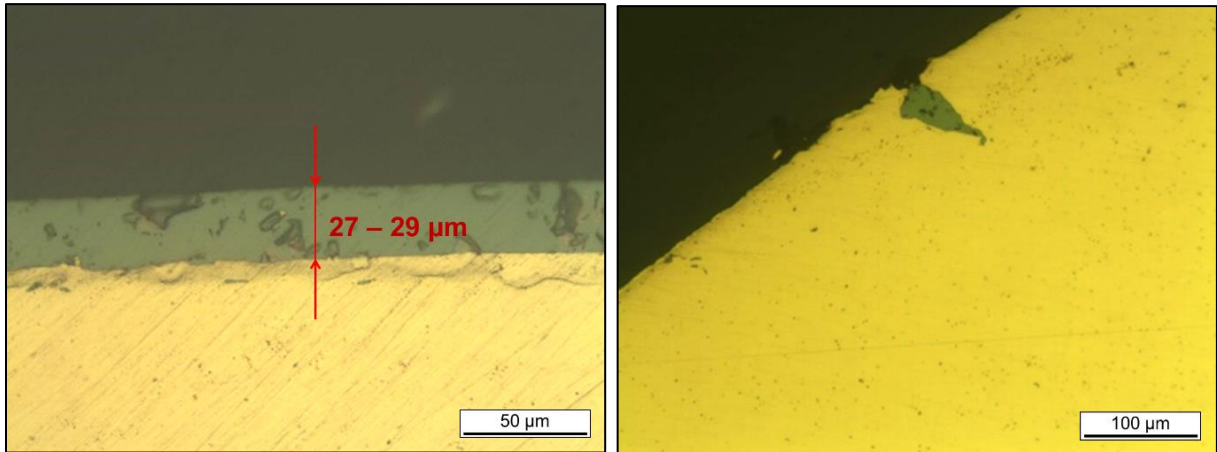


Abbildung 5: Zunderschicht auf der Gießstrangoberfläche (links), Zunderstelle an/unter der Oberfläche des Gießwalzdrahtes $d = 8 \text{ mm}$ (rechts)

3 Entzunderung bei der Drahtherstellung

Da sich nach [2] und aus eigenen Beobachtungen beim Warmwalzen des Kupferdrahtes das Eindringen von Kupferoxiden in und unter die Drahtoberfläche nicht vermeiden lässt, werden einige Methoden zur Desoxidation bzw. Zunderentfernung von Metalloberflächen beschrieben. Nach [15] lassen sie sich in (elektro-)chemische und mechanische Wirkverfahren einteilen (Abbildung 6).

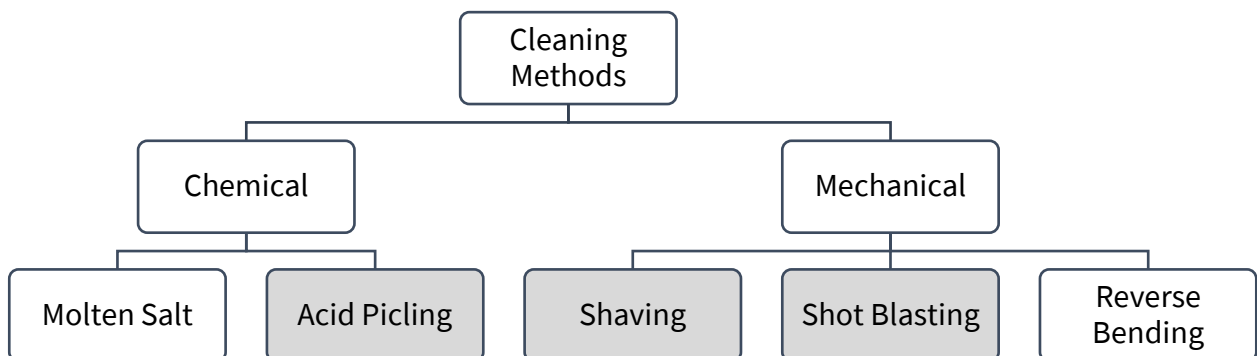


Abbildung 6: Übersicht über Entzunderungsmethoden nach [15] (beige hinterlegte Felder finden bei der Kupferdrahtherstellung Anwendung)

Chemisches Entzundern (Beizen)

Das Beizen des Kupferdrahtes erfolgt nach dem Walzen und der Abkühlung bei ca. $80 \text{ }^\circ\text{C}$. Im Anschluss erfolgt die Spülung des Drahts in kaltem und warmem Wasser. Als Beizflüssigkeit

O. Schwedler, H. Busch: Beitrag zur Qualitätsverbesserung von Gießwalzdraht aus Kupfer durch Einsatz eines inline-Hochdruckentzunderungssystems

S. 9/22

02/2023

Verlag Meisenbach GmbH, Geisfelder Straße 14
96050 Bamberg/Deutschland

www.umformtechnik.net/whitepaper/

wurde zunächst Zitronensäure, später dann 5 – 10%-ige Schwefelsäure verwendet. Eingewalzte CuO-Partikel können vergleichsweise leicht chemisch entfernt werden, es sei denn die Oxide sind von Kupfer bedeckt, so dass die Beizflüssigkeit nicht wirksam werden kann. [1, 2, 6, 15]

Ziehschälen (Shaving)

Das Schälen des Kupferdrahtes wird insbesondere dann durchgeführt, wenn das Vormaterial für die Lackdrahtfertigung vorgesehen ist. Prinzipiell wird beim Ziehschälen der Gießwalzdraht vor dem eigentlichen Ziehprozess durch ein ringförmiges Messer gezogen, dessen Innendurchmesser etwas geringer ist als der Vordrahtdurchmesser. Auf diese Weise werden Fehler auf der Drahtoberfläche bzw. kurz darunter spanend entfernt. Einen Nachteil dieses Verfahrens bildet der hohe Materialverlust, der in Abhängigkeit von der Tiefe der Oberflächenabnahme bis zu 15% betragen kann. [15]

Beide Verfahren sind sehr kostenintensiv, da sie einen zusätzlichen Prozessschritt in der Prozesskette *Gießwalzdrahtherstellung* bilden. Neben dem bereits erwähnten hohen Materialverlust beim Ziehschälen, sind beim Beizen erhebliche Umwelt- und Arbeitsschutzbedingungen einzuhalten.

Hydromechanisches Entzundern mit abrasiven Medien

Bei diesen Entzunderungsverfahren wird Zunder durch hohen Wasserdruck entfernt. Die Wirkprinzipien zum Aufbrechen des Oberflächenzunders bestehen aus mechanischen Brech- und Schereffekten, die durch den sog. *impact* ausgelöst werden. Des Weiteren wird Zunder aufgrund unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten von Metall und Metalloxiden auf der Oberfläche, beim Verdampfen des kühleren Fluids explosionsartig gelöst. [16]

Kenngößen beim Entzundern

Die Angabe des in seiner Wirkung ausreichenden und somit maximalen Systemdrucks, die wenig Aussagen über die Wirksamkeit an der Entzunderungsstelle erlaubt, wird in der Literatur mit bis zu maximal 400 bzw. 650 bar angegeben. Die dabei auf die Möglichkeiten der Entzunderung geprüften Werkstoffe beinhalten im Wesentlichen Stähle mit verschiedenen Si-, Al- und Cr-Anteilen und hochlegierte Stähle. Die beim abrasiven Entzundern wirksame physikalische Wirkgröße ist ein mechanischer Druck (Impact), der sich aus einem beschreibbaren Verhältnis aus der wirkenden Kraft des Fluids auf die gerade zu entzundernde Fläche zusammensetzt. Die mathematische Beschreibung der hierfür in Wechselwirkung stehenden physikalischen und geometrischen Größen der Düsen werden ausführlich in [16–21] beschrieben.

Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal bei hydromechanisch arbeitenden Entzunderungssystemen besteht zwischen der Relativbewegung des abrasiv wirkenden Düsenstrahls zur Werkstückoberfläche. Es wird zwischen translatorisch und rotierend arbeitenden Systemen unterschieden. Ein etabliertes Entzunderungsverfahren hat die Firma Hermetik mit dem Tornado®-System entwickelt [22, 23]. Hierbei handelt es sich um ein Entzunderungsverfahren mit rotierenden Düsenköpfen, in denen eine variable Anzahl von Düsen eingesetzt werden kann. Bei dem vergleichsweise neuen System PiroScale® der Firma SMS-group [24] kommen ebenfalls rotierende Düsenköpfe zum Einsatz, wobei jeder Kopf drei Düsen beinhaltet. In Abhängigkeit von der Entzunderungsbreite werden mehrere Düsenköpfe leicht überlappend nebeneinander, orthogonal zur Materialaufrichtung angeordnet. Die um 60° zueinander versetzten Düsenköpfe werden, um Berührungen zu vermeiden, synchron angetrieben. In [25] wird für rotierend arbeitende Düsen eine Computersimulationslösung vorgestellt, anhand derer das optimale Entzunderungsergebnis in Abhängigkeit von Drehzahl des Düsenkopfes und linearer Bewegungsgeschwindigkeit des Walzmaterials abgeschätzt werden kann.

3.1 Entzunderung bei der Gießwalzdrahtherstellung bei KME

Um dem beschriebenen Verzunderungseffekt des Gießstrangs der KME-Contirod®-Anlage entgegenzuwirken, wurde ein Entzunderungssystem der Fa. Hermetik in die Gießwalzdraht-Anlage installiert. Die Positionierung der Entzunderungsbox erfolgte unmittelbar hinter dem Strangkantenfräser und vor dem Einlauf in das Vorwalzwerk. Zum einen ist der Kupferstrang nach dieser Position nicht weiter Luftsauerstoff ausgesetzt (N₂-Inertisierung der beiden Walzwerke), auf der anderen Seite bietet diese Stelle ausreichend Platz für die Box.

Jede Seite des rechteckigen Kupferstrangs mit einem Querschnitt von 90 x 60 mm² wird mit einem Düsenrotor entzundert. Dabei variieren die Rotordurchmesser und die Anzahl der verbauten Düsen in Abhängigkeit von der Strangseite (oben = unten, rechts = links). Für einen gleichmäßigen Zunderabtrag auf allen vier Seiten des Stranges, ist eine akkurate zentrierte Ausrichtung der Rotoren zur Strangoberfläche erforderlich. Hierzu wird die Box vor Produktionsstart unter Zuhilfenahme eines Strang-Dummys ausgerichtet, eine seitliche Ausrichtung ist auch während des Betriebs der DGW-Anlage möglich.

Die Drehzahlen der einzelnen Düsenköpfe können in einem Bereich zwischen 400 und 1.100 min⁻¹ eingestellt werden, wodurch die Häufigkeit des Überstreichens (overlapping) der zu entzundernden Stelle angepasst werden kann. Hierzu wird jeder Rotor separat durch einen Drehstrommotor mit vorgeschaltetem Frequenzumrichter angetrieben.

Als wirkendes Fluid wird die systemrelevante Walzemulsion des Vorwalzwerkes genutzt. Vorteilhaft ist, dass so eine bereits vorhandene Medienversorgung genutzt werden kann. Durch

das vorhandene Bandfiltersystem für diese Emulsion, können die von der Strangoberfläche entfernten Zunder- und Kupferpartikel einfach aus der Emulsion herausgefiltert werden. Zusätzlich wird noch eine Feinfiltration der Emulsion (Filterbereich = 25 µm) vorgenommen, um die Pumpen und Düsenköpfe des Systems vor der Abrasivwirkung der Zunderpartikel zu schützen.

Die Gewährleistung adäquater Fluidmengen und -drücke wird durch vier in Reihe geschaltete Plungerpumpen HJJ 223 (Fa. Hermetik) sichergestellt. Angetrieben durch vier Elektromotoren (je P = 160 kW) kann in Abhängigkeit von der Anzahl der zugeschalteten Pumpen (1-4) und von der gewählten Umdrehungszahl ein maximaler Systemdruck von 1.200 bar aufgebracht werden.

In Vorversuchen an einer Miniaturentzunderungsanlage mit einem Rotor, wurde eine Parameterstudie mit dem Ziel durchgeführt, die vollständige Entzunderung auf 920°C erwärmte Kupferproben zu erreichen. Die Bewertung der Entzunderungsqualität wurde visuell durchgeführt. Der optimale Parametersatz wurde auf das Entzunderungssystem der Gießwalzdraht-Anlage bei KME übertragen.

- Anzahl der Düsen = 28 (verteilt auf vier Rotorköpfe)
- Durchmesser der Düsenöffnung = 0,8 mm
- Düsenöffnungswinkel = 7,5°
- Abstand Düsenöffnung-Kupferstrangoberfläche = 15 mm
- Drehzahl der vier Rotoren = 900 min⁻¹ (einzeln einstellbar)
- Systemdruck p = 1.150 bar
- Geschwindigkeit des Kupfer-Gießstranges = 10 m/min
- Stickstoffinertisierung der Walzwerke
- Produkt: Cu-ETP – Gießwalzdraht (d = 8,0 mm)

Die Entzunderungsbox wird bei laufender Gießwalzdrahtherstellung zugeschaltet und der Systemdruck durch Heraufsetzen der Pumpendrehzahl schrittweise erhöht. Aufgrund der sich dadurch ändernden Oberflächentemperatur des Gießstranges ist eine Reduzierung der Sekundärkühlung erforderlich, damit die zulässigen Maximaldrehmomente der Walzantriebe aufgrund der abkühlbedingten Zunahme der Strangfestigkeit nicht überschritten werden. Die Strangentzunderung wurde für mehrere Stunden durchgeführt und von ausgewählten Drahtcoils Proben zur Auswertung genommen und mit nicht entzundernden Proben verglichen.

3.2 Bewertung der Wirksamkeit der Druckentzunderung

Zunächst wurde für die Bewertung der Entzunderungsqualität am Gießwalzdraht die in der betrieblichen Praxis eingesetzten Methoden (s. Tabelle 2) angewendet. Die Tatsache, dass trotz Zuschaltung des Entzunderungssystems keine vollständige Zunderfreiheit des Drahtes erreicht werden konnte, erforderte für die Bewertbarkeit weitere Bewertungsmethoden. Zum einen sollte der Entzunderungseffekt unmittelbar auf dem Gießstrang bewertbar werden (Walzstecker). Darüber hinaus stellte sich heraus, dass die diskrete Auswertgröße des Torsionstests unzureichend ist. Als Erweiterung wurde der „Flachwalztest“ mit der stetigen Messgröße Zunderzeilenlänge entwickelt.

Der zur Auswertung vorgeschlagene und nicht standardisierte *Dust-Test* sieht vor, die Entzunderungsleistung durch die Gewichtsabnahme einer Drahtprobe vor und nach der Torsion zu bewerten. Die Gewichts-differenz ist das Maß für den herausgerieselten Zunder aus den sich durch die Torsion öffnenden oberflächennahen Zunderzeilen. Dieses Testverfahren wurde probiert, die Anwendung aber aufgrund zu geringer Massendifferenzen eingestellt.

3.2.1 Bewertung von Walzsteckern

Eine eindeutige Aussage über die Qualität der Entzunderung erlaubt die Entnahme und visuelle Auswertung eines Teils vom entzundernten Gießstrang. Zu Entnahme ist am besten der Bereich zwischen dem Entzunderer und dem ersten Walzenpaar geeignet (Abbildung 7).

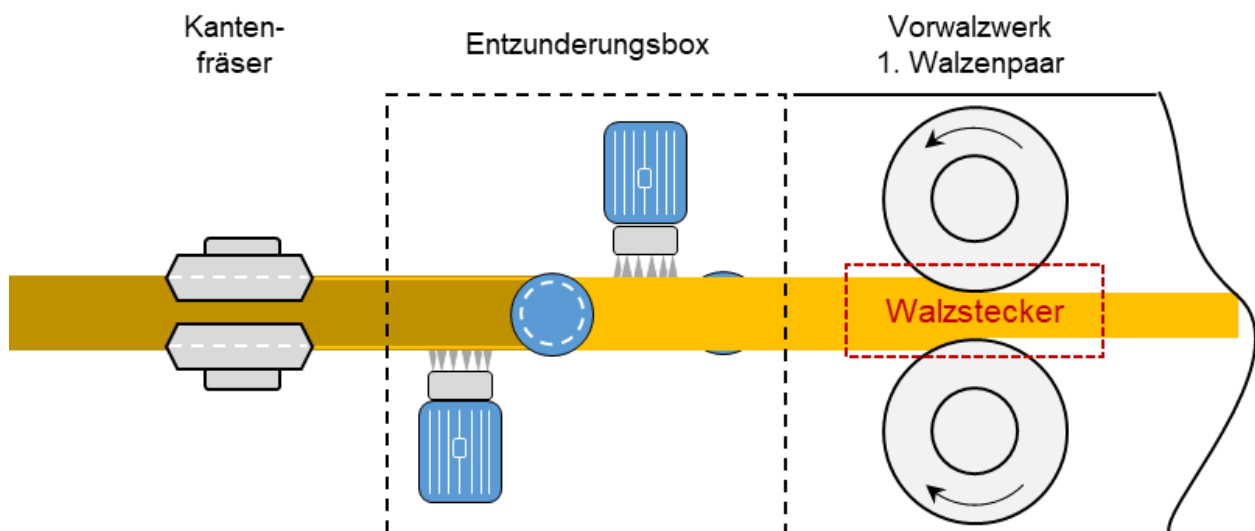


Abbildung 7: Entnahmeort der Strangprobe (rot gestrichelt)

In Abbildung 8 sind zwei Walzstecker mit unterschiedlichen Entzunderungsqualitäten an der in Produktionsrichtung rechten Strangseite gegenübergestellt. Im linken Bild ist das Ergebnis einer ungenügend genauen Ausrichtung der Düsenköpfe zum Strang und eine zu gering eingestellte Rotordrehzahl zu sehen. Am unteren Rand des Stranges entsteht ein ca. 1 cm breiter Streifen. Für die zu unzureichende Rotorendrehzahl sprechen die sichelförmigen Zunderausprägungen. Im rechten Bild ist die Ausrichtung der Rotoren zum Strang dagegen optimal. Auch die gewählte Drehzahl der Rotoren ist günstiger, häufigeres Überfahren derselben Strangstelle fördert die Entzunderung.

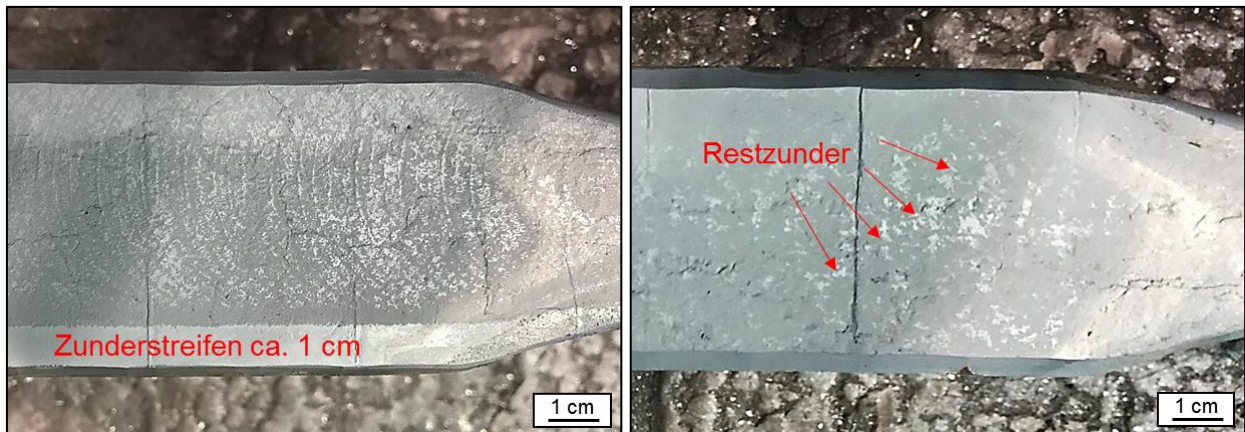


Abbildung 8: Abgekühlter Gießstrang (Ansicht der rechten Seite) ungenügendes Entzunderungsergebnis (links), gutes Entzunderungsergebnis (rechts)

Neben der visuellen Begutachtung der Strangoberflächen wurden auch metallografische Querschliffe aus den entzunderten Strangbereichen angefertigt. Die Restzunderdickenmessung ist aufgrund der Sekundärzunderbildung schwierig. Hilfreich für die Auswertung sind aber hier die kurz vor Einlauf in den Entzunderer gefrästen und somit absolut zunderfreien Strangkanten. Die hier in der Auswertung ermittelte Sekundärzunderschichtdicke sollte mit der an den strangentzunderten Stellen übereinstimmen. Nach Vergleichsmessungen der Zunderschichtdicken konnte die Wirksamkeit der Entzunderung nachgewiesen werden (Tabelle 4).

Tabelle 4: Ergebnisse der Zunderschichtdickenbestimmung

Bereich des Kupferstrangs	Zunderschichtdicke
nicht entzunderter Bereich (siehe auch Abbildung 4)	27 – 30 µm (Primärzunder)
gefräste Strangkante / entzunderter Strangbereich	12 – 15 µm (Sekundärzunder)

3.2.2 Ergebnisse der Wirbelstromprüfung

Unter Zuhilfenahme der Wirbelstromprüfung können elektrisch leitfähige Materialien im oberflächennahen Bereich auf Poren, Einschlüsse und Risse untersucht werden. Die ausgewertete Ergebnisgröße ist die Induktionsspannung der Empfängergröße bzw. bei empfindlicheren Messaufgaben die Spannungsdifferenz zwischen mehreren Empfängerspulen.

Leider erlaubt das bei KME im Einsatz befindliche Inline-Wirbelstrommesssystem kein Mitschreiben der Ergebnisse, so dass eine nachträgliche Auswertung nicht möglich ist. Was aber in situ beobachtet wurde ist, dass das Grundrauschen des Spannungssignals bei zugeschaltetem Entzunderungssystem auf ein Drittel reduziert wurde. Diese Tatsache spricht für weniger Zunder am gefertigten Gießwalzdraht und somit für die Wirksamkeit der Druckentzunderung.

3.2.3 Torsionstest

Torsions- oder Twist-Tests sind eine seit langem in der Drahtproduktion etablierte Qualitätsbewertungsmethode die an Proben des fertig produzierten Gießwalzdrahtes durchgeführt werden. Durch das Verdrehen des Drahtes reißen oberflächennahe Fehlbereiche auf, die äußerlich im untordierten Draht nicht sichtbar sind. Bei genauerer Recherche wird deutlich, dass es nicht den Torsionstest gibt. Vielmehr kann diese Art von Test nach:

- Einspannlänge des Drahtes,
- Verdrehgeschwindigkeit des Drahtes,
- Drehrichtung (eine Richtung, hin/zurück),
- Vorgabe der Anzahl der Umdrehungen und/oder
- Zählen der Verdrehungen bis zum Bruch der Probe

unterschieden werden. Die qualitative Bewertung und Einordnung erfolgt durch eine Zuordnung der zu einem Drahtcoil zugehörigen Torsionsprobe zu definierten Güteklassen, die in Anlehnung an das Schulnotensystem definiert sind. [1, 2, 6]

Für die Bewertung der Entzunderungsqualität wurden werksintern standardisierte Torsionsproben angefertigt, die 15mal in eine Richtung tordiert wurden. Die Einspannlänge entspricht in etwa dem halben Umfang der Walzen ($l = 125-140$ mm) des letzten Walzenpaars.

In Abbildung 9-links ist ein Ausschnitt eines tordierten Gießwalzdrahtes abgebildet, in dessen Mitte eine aufgerissene Zunderzeile sichtbar ist. Unter gleichen Versuchsbedingungen (Kathodeneinsatz, Ofen-/Gießparameter, Walzwerkeinstellungen etc.) wurden Proben von zwei GWD-Coils unter Standardproduktionsbedingungen und vier Drahtenden mit zugeschaltetem Entzunderungssystem ($p = 1.150$ bar) qualitativ bewertet. Die subjektive Bewertung, die neben

dem Verzunderungszustand noch weitere Drahtdefekte wie Überwalzungen und Schalenbildungen auf der Drahtoberfläche berücksichtigt, verdeutlicht einen Verbesserungseffekt durch das Entzundern. Die Bewertung der Drahtqualität, die an das Schulnotensystem angelehnt ist, zeigt Abbildung 9-rechts.

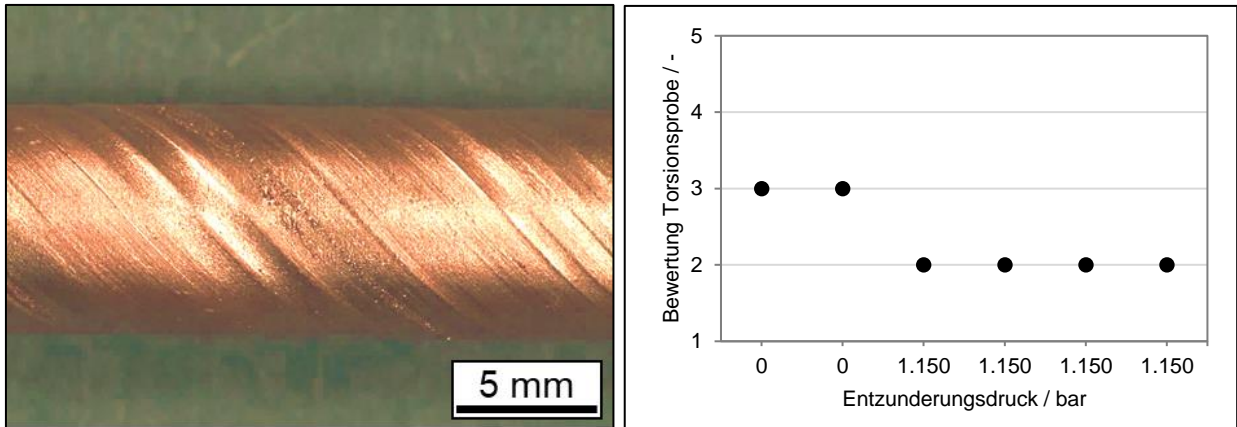


Abbildung 9: Tordierter Kupferdraht mit geöffneter Zunderzeile (links), Bewertung der Torsionsproben nichtentzündet/entzündet (rechts)

Neben der äußeren visuellen Bewertung und Zuordnung einer Qualitätsnote (1-5) wurden von den Torsionsproben metallografische Längs- und Querschliffe an einer zufällig gewählten Stelle angefertigt. Die sichtbare Bewertungsfläche des Querschliffs ist rund und hat den Durchmesser des Gießwalzdrahtes. Der Längsschliff entstammt der Drahtmitte und hat eine Abmessung von $12 \times 8 \text{ mm}^2$. Die visuelle Auswertung erfolgt mikroskopisch bei einer sinnvollen Vergrößerung. Ausgewertet wurden zum einen die Anzahl der sichtbaren Zunderpartikel und die Messung der tiefsten Ausprägung unter der Drahtoberfläche. Die Einteilung von Zunderausprägungen in zwei Gruppen und die jeweiligen Auswertegrößen sind in Tabelle 5 aufgezeigt.

Tabelle 5: Einteilung von Zunderpartikeldefekten

Zunder-Defekt	Einzelzunderpartikel	Randzunderpartikel
Merkmale	<ul style="list-style-type: none"> • einzelne große Einschlüsse ohne Verbindung zur Drahtoberfläche 	<ul style="list-style-type: none"> • mehrere kleine Partikel, teilweise mit Verbindung zur Drahtoberfläche • Tiefe unter der Oberfläche $\leq 20 \mu\text{m}$
Auswertegröße	<ul style="list-style-type: none"> • Anzahl im Querschliff • Maximaltiefe im Querschliff 	<ul style="list-style-type: none"> • Anzahl im Längsschliff • Anzahl im Querschliff
Abbildung	<ul style="list-style-type: none"> • Abbildung 10 (links) 	<ul style="list-style-type: none"> • Abbildung 10 (rechts)

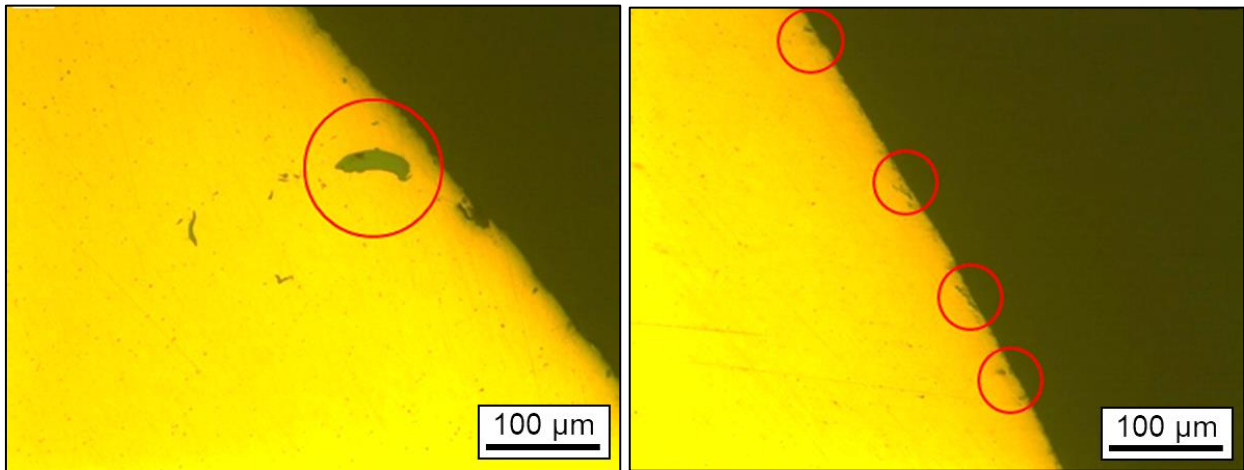


Abbildung 10: Einzelzunderpartikel (links), Randzunderpartikel (rechts)

In den folgenden Diagrammen wurde die Wirksamkeit der Entzunderung bei $p = 1.150$ bar an Schliffen aus tordierten Proben beider Zustände (11 x nicht entzündet, 11 x entzündet) gegenübergestellt. Zur besseren Auswertbarkeit werden die Ergebnisse (Zunderanzahl, -tiefe) in den Diagrammen in aufsteigender, nicht zeitlicher Reihenfolge geordnet dargestellt.

Wie Abbildung 11-links verdeutlicht, reduziert sich die Anzahl von Einzelzunderpartikeln bei der Entzunderung des Gießstrangs um etwa ein Drittel. Ebenso kann eine Abnahme der maximalen Tiefe der Einzelpartikel unter der Drahtoberfläche beobachtet werden (Abbildung 11-rechts). Im Mittel verringert sich die Tiefe um $18 \mu\text{m}$.

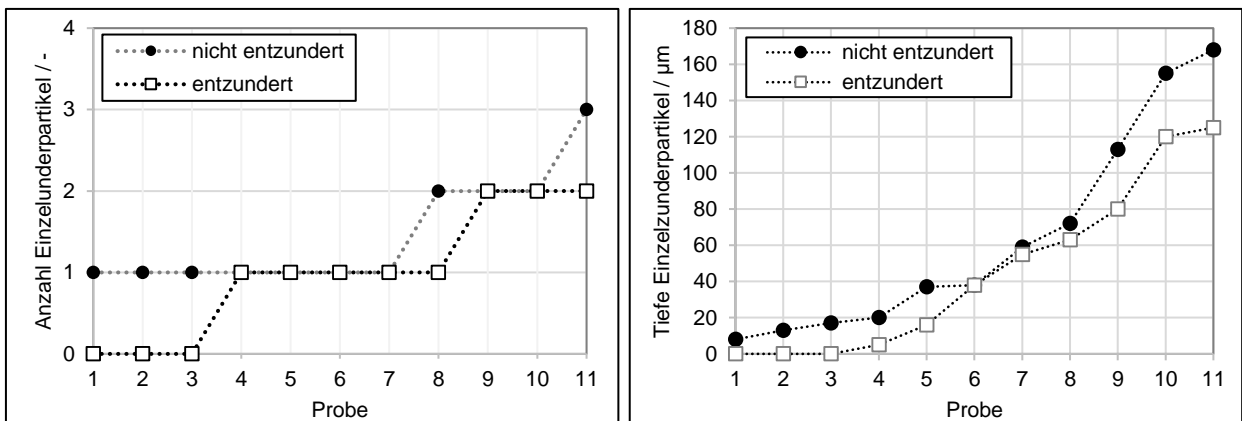


Abbildung 11: Vergleich von Anzahl und maximaler Tiefe unter der Drahtoberfläche von Einzelzunderpartikeln

Auch die Anzahl von Randzunderpartikeln konnte durch die Entzunderung reduziert werden. Nach Auszählung in den Querschliffen um etwa die Hälfte und in den Längsschliffen sogar um ca. 40 % (Abbildung 12).

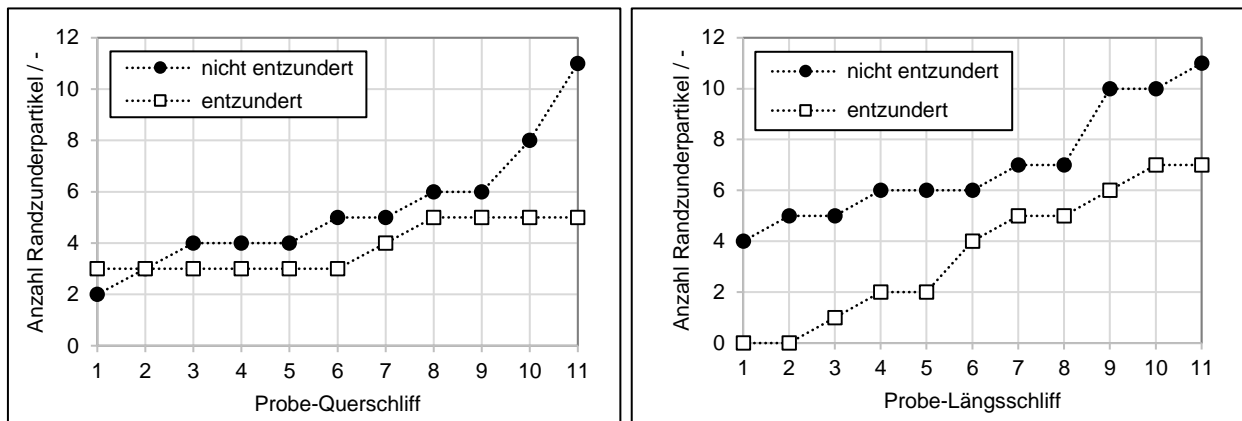


Abbildung 12: Vergleich der Anzahl von Randzunderpartikeln unter der Drahtoberfläche im Querschliff (links), im Längsschliff (rechts)

3.2.4 Flachwalzen von Runddraht

Um sicherere Aussagen über Zundermengen unter der Drahtoberfläche zu erhalten, wurde eine weitere Qualitätsbewertung erdacht und umgesetzt. Bei der industriellen Flachdrahtherstellung wird aus rundem Gießwalzdraht in mehreren Walzenstufen ein flacher rechteckiger Draht mit runden Kanten gewalzt. Aufgrund der starken Dickenreduktion des Runddrahtes, treten Zunderereinschlüsse an die Materialoberfläche und werden somit einfacher detektierbar. Die Bilder einer FEM-Simulation, in der die sich ändernde Position von Zunderpartikeln über fünf Walzstiche simuliert wurde, verdeutlichen diesen Zusammenhang (Abbildung 13).

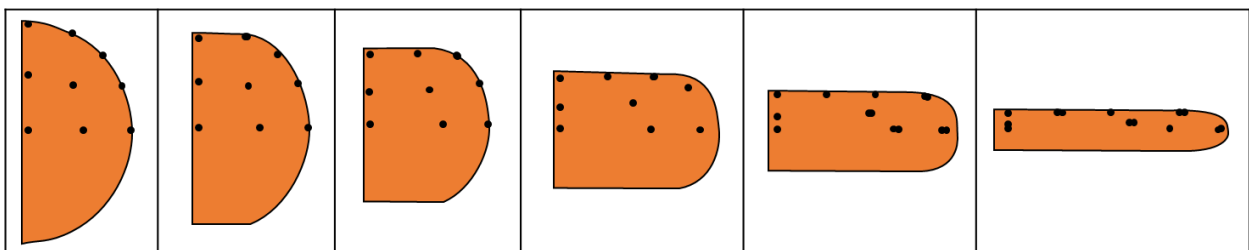


Abbildung 13: Ermittlung der Ortsänderung von Zunderpartikeln (rot) beim Flachwalzen von Gießwalzdraht mittels FEM (Halbmodell)

Die Methodik des Flachwalzens wurde auch hier zu Bewertung der Wirksamkeit des Entzunderns auf die Qualität des Gießwalzdrahtes genutzt. Der runde Draht ($d = 8,0 \text{ mm}$) wurde

auf einem Flachwalzwerk in sieben Walzschritten auf eine Dicke von $1,2 \pm 0,01$ mm gewalzt. Die visuelle Bewertung erfolgt auf beiden Flachprobenseiten bei 7,5-facher optischer Vergrößerung und das anschließende Ausmessen und Addieren der Zunderzeilenlängen. Eine detektierte und eingegrenzte Zunderzeile ist in Abbildung 14-links zu sehen. Für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse wird die summierte Zunderzeilenlänge in Millimeter auf einen Meter Länge der Drahtprobe bezogen.

In Abbildung 14-rechts sind die Zunderzeilenverhältnisse von flachgewalzten Drähten gegenübergestellt. Hier ist eine deutliche Abnahme der Zunderzeilenlängen und somit eine bessere Gießwalzdraht-Qualität bei der Entzunderung des Gießstranges zu erkennen. Bei den Drahtproben, deren Gießstrang zuvor nicht entzündert wurde, ist eine drei bis sieben Mal höhere CuO-Kontaminierung zu erkennen.

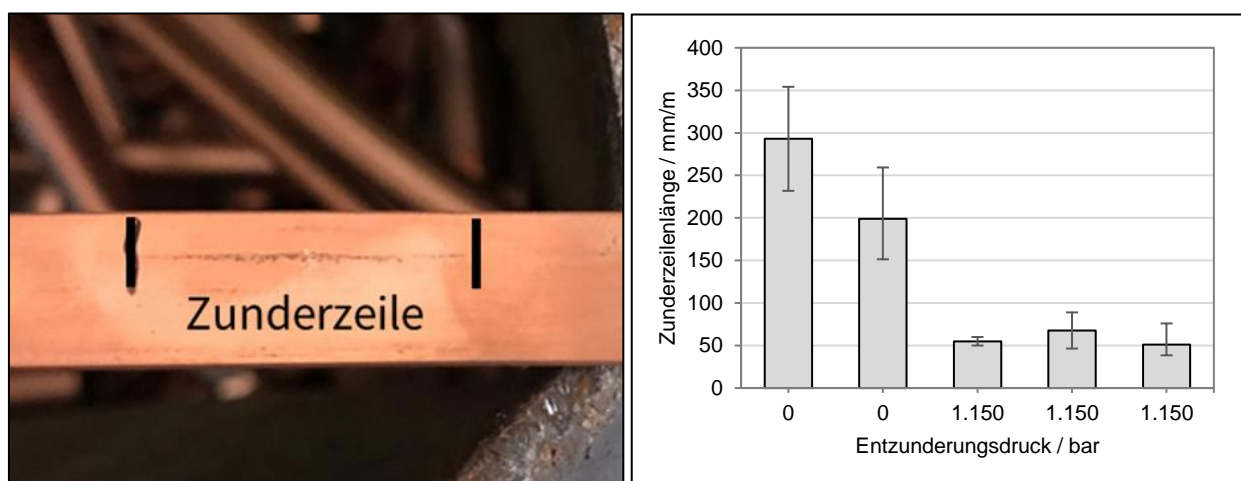


Abbildung 14: Zunderzeile auf einem flachgewalzten Draht (links), Ergebnisse der Flachwalzauswertung (rechts)

4 Zusammenfassung

Abschließend sei noch einmal darauf hingewiesen, dass es gut gelungen ist, in den gegebenen Bauraum der Großanlage zur Gießwalzdrahtherstellung eine Entzunderungsbox zu installieren, die über das vorhandenen Fluid (Walzemulsion) einen Systemdruck zur Entzunderung von bis zu 1.200 bar gewährleisten kann. Darüber hinaus konnten die qualitativen Eigenschaften des Gießwalzdrahtes in Hinsicht auf Zundereinschlüsse verbessert werden. Trotz der optimalen geometrischen Ausrichtung zwischen Entzunderungsdüsen und Gießstrang und einem sehr hohen Impact des abrasiven Mediums ist der produzierte Gießwalzdraht nicht völlig zunderfrei.

Eine Möglichkeit für das Bestehen von Restzunder könnten oberflächennahe Poren im Gießstrang sein, die beim Austritt aus der Gießmaschine mit Luftsauerstoff in Berührung gekommen sind. Aufgrund der hinterschnittenen geometrischen Form solcher Poren, vermag der abrasive Fluidstrahl trotz mehrfachen Überstreichens der gleichen Stelle keine vollständige Entzunderung. Eine weitere Quelle für Restzunder kann die Umformung durch Walzen mit sich bringen. An einigen Walzenpaaren bspw. bilden sich dicke Kupferoxidbeläge, die während der Umformung von der Strangoberfläche abgetrennt worden sind. Solche Oxide können wenig später wieder in den Strang eingewalzt werden und die Drahtqualität negativ beeinflussen. Auf der anderen Seite ist die Strangoberfläche nach dem Aufreißen sehr reaktiv, so dass auch hier durch die Reaktion mit Sauerstoff erneut Zunder entstehen kann. Verhindert werden können solche Effekte durch optimierte Walzparameter (Kalibrierung), geeignete Emulsionszusammensetzungen oder auch durch die Inertisierung der Walzwerke bspw. mit Stickstoff.

5 Literatur

- [1] E. H. Chia, R. D. Adams, und J. Kajuch, „Torsional stress test for copper rod: indicator for quality and performance“, Nr. 6, S. 57–67, 1986.
- [2] W. Teller, „Fortschritte und Probleme bei der Fertigung von Kupferdrähten für die Elektrotechnik“, Nr. 8, S. 499–508, 1969.
- [3] Verein Deutscher Ingenieure, Hrsg., „Wire Rod Defects“. Verlag Stahleisen Düsseldorf, 1973.
- [4] SMS group, „SMS - Contirod-Technology“. Zugegriffen: Apr. 16, 2020. [Online]. Verfügbar unter: www.sms-group.com.
- [5] J. M. Dompas, „Contirod® - ein spezielles Verfahren zur Erzeugung von Qualitäts-Kupferdraht“, Nr. 7/8, S. 322–330, 1975.
- [6] H.-D. Hirschfelder, „Gießwalzdraht - Vergleich der Herstellverfahren“, Bd. 29, Nr. 4, S. 164–170, 1978.
- [7] K. Dies, *Kupfer und Kupferlegierungen in der Technik*, 1. Berlin: Springer Verlag, 1967.
- [8] H.-J. Schneider, „Zur Gleichgewichtslöslichkeit von Wasserstoff und Sauerstoff in Schmelzen aus Kupfer und Kupferlegierungen bei Einwirken von Wasserdampf“, Dissertation, Technische Hochschule, Braunschweig, 1959.
- [9] E. H. Chia und P. M. Jackson, „Demerit grading system: a description of quality tests for copper rod“, Nr. 12, S. 56–60, 1978.
- [10] J.-P. Wang und W. D. Cho, „Oxidation Behavior of Pure Copper in Oxygene and/or Water Vapor at Intermediate Temperature“, Bd. 49, Nr. 12, S. 1926–1931, 2009.
- [11] J. Berg, „Kupfer als Katalysator für Partialoxidation“, Dissertation, Technische Universität, Darmstadt, 2009.
- [12] G. I. Teneva-Kosseva, „Oxidschichtbildung und Materialprobleme metallischer Werkstoffe bei Verbrennungsprozessen mit Heizöl EL“, Dissertation, RWTH, Aachen, 2005.
- [13] H.-J. Christ, „Hochtemperaturkorrosion“, Vorlesungsscriptum, Universität, Siegen.
- [14] K. Hauffe, *Oxydation von Metallen und Metallegierungen*. Berlin: Springer Verlag, 1956.

O. Schwedler, H. Busch: Beitrag zur Qualitätsverbesserung von Gießwalzdraht aus Kupfer durch Einsatz eines inline-Hochdruckentzunderungssystems

S. 21/22

02/2023

Verlag Meisenbach GmbH, Geisfelder Straße 14
96050 Bamberg/Deutschland

www.umformtechnik.net/whitepaper/

- [15] A. F. Gerds und F. W. Bougler, „Rod, Wire and Tube Drawing“, in *Metal Deformation Processing: A survey conducted as part of the metalworking process and equipment program*, Battelle Memorial Institute, Hrsg. Coloumbus, 1966, S. 78–124.
- [16] D. Farrugia, A. Richardson, und Y. Lan, „Advancement in understanding of descalability during high pressure descaling“, Nr. 622–623, S. 29–36, 2014.
- [17] J. Horský, M. Raudenský, und L. Vavrecka, „Experimental Study of hydraulic Descaling“, gehalten auf der 5th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics Descaling, Sun City, South Africa, 04.07 2007.
- [18] L. Bending, M. Raudenský, und J. Horský, „Descaling with high pressure nozzles“, gehalten auf der 17th Annual Conference on Liquid Atomization & Spray Systems, Zurich, 06.09 2001.
- [19] N. Medan, M. Lobontiu, und M. Banica, „Full factorial DOE to determine the influence of the process parameters in cleaning water jets using in sewer cleaning“, gehalten auf der 4th International Conference on Computing and Solutions in manufacturing Engineering - CoSME'16, Brasov, Romania.
- [20] „Innovate high temperature and mechanical descaling (HIDES)“, European Commission, Research Fund for Coal and Steel EUR 26177, 2013.
- [21] J. W. Frick, „More efficient hydraulic descaling header designs“, Nr. 02, S. 90–94, 2004.
- [22] J. Gaydoul, „Modern HERMETIK descaling technology for materials with higher carbon, nickel, chromium and silicon content“, gehalten auf der IX. International Steel Conference, Moscow, Feb. 17, 2015.
- [23] J. Gaydoul, „Efficient technical solutions for descaling in the hot strip production“, Freiberg, März 17, 2016.
- [24] A. Ante, P. Brücher, und J. Kiessling-Romanus, „Recycling of Water and Valuables in Steel Production“, Nr. 10, S. 1434–1444, 2019.
- [25] D. Schulze-Schenking und U. Hertel, „Systematic development of a rotary descaling device“, gehalten auf der OXI 2018 European Oxide Scale Conference, London, 12.12 2018.