

Herstellung von Leonischen Waren aus Heiz- und Widerstandsdrähten

Erfahrungen mit harten und spröden Legierungen

Nachtrab, J.; Beuscher, F. (1)

Leonische Waren sind Produkte aus Drahtmaterialien, die beispielsweise für textile Zwecke wie Stickereien und Gewebe hergestellt werden. Insbesondere finden Feindrähte ($d = 100 \mu\text{m}$), Plätt oder Lahn (flachgewalzter Feindraht) und Gespinste (Plätt, das um einen Trägerfaden gewickelt wird) für derartige Produkte Verwendung. Eine andere Klasse leonischer Waren entsteht durch das Umwickeln einer meist zylindrischen Form mit Plätt oder Feindraht, sodass nach dem Entfernen der Form eine federähnliche Struktur entsteht (Bouillon). Hauptanwendungsgebiet war zu Beginn des 20. Jahrhunderts vor allem der Bereich Christbaumschmuck.

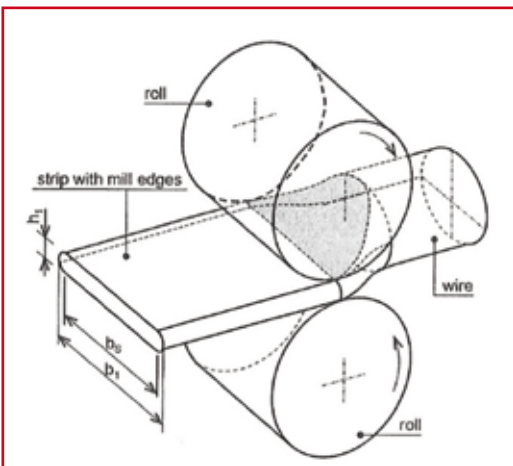


Bild 1: Schematische Darstellung der Umformtechnik „Flachwalzen“ (aus [4])

Im Laufe der Zeit haben Materialauswahl und Verwendungszweck immer wieder Änderungen erfahren. 5.000 Jahre alte Grabfunde von kunstvoll erstellten Textilien mit Feindrähten aus Gold waren schon damals ein Zeichen von Reichtum und Macht. Zu Beginn des 15. Jahrhunderts wurde begonnen, durch Flachwalzen solcher Feindrähte Plätt für die Herstellung von Gespinsten zu fertigen. Aufgrund der großen Beliebtheit von Trägerfäden aus Seide - das Zentrum der Seideherstellung befand sich zu dieser Zeit in und um Lyon - etablierte sich der von der geografischen Bezeichnung abgeleitete Name Leonische Waren.

Der Massenverbrauch leonischer Waren wurde im 17. Jahrhundert möglich, indem glühende Kupferdrähte Zinkdämpfen ausgesetzt worden sind, sodass das auf der Oberfläche entstehende Messing aus optischer Sicht goldähnliche Fäden auf wesentlich billigere Weise fertigen ließ.

In den 1950er Jahren sind schließlich Aluminiumfolien verwendet worden, die mit Kunststoffolien kaschiert worden sind. In der Folgezeit setzten im Zuge der Automatisierung gewaltige Innovationsschübe ein. Die Maschinensteuerung erfolgte zunächst über Lochkarten, bevor der Siegeszug des Computers die preiswerte Fertigung ermöglichte. Leonische Waren erhielten schließlich Einzug in die Leitungs- und Kabelindustrie und werden immer dann eingesetzt, wenn eine große Biege- und

selfestigkeit benötigt wird. Prominente Vertreter sind Produkte zur Anwendung als Lautsprecherkabel oder Sitzheizungen, für die nahezu ausschließlich Kupfer eingesetzt wird. Im Rahmen dieses Aufsatzes werden Erkenntnisse der Herstellung von leonischen Produkten aus wenig duktilen Heizleiter- und Widerstandsdrähten dargestellt. Im Mittelpunkt der Diskussion steht der Einfluss des wichtigen Schrittes Flachwalzen auf mechanische und elektrische Eigenschaften der untersuchten Materialien [1], [2].

Materialauswahl, Anwendungsgebiete, Physikalische Eigenschaften

In Anwendungen unterschiedlicher Art kommen oftmals wenig duktile Metalllegierungen zum Einsatz. Detailliertere Ausführungen zu den Auswahlkriterien sind [3] zu entnehmen. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht über die untersuchten Legierungen und deren Anwendungsfelder.

Besonders interessant ist die CuMnAl-Legierung, die bei nahezu gleichem elektrischen Widerstand eine um rund 10 % kleinere Dichte zeigt.

Grundbegriffe aus dem Bereich „Walzen von Drahtmaterialien“

Im Gegensatz zum Drahtzug ist Walzen eine stark anisotrope Umformtechnik. Bild 1 zeigt, dass beim Walzen der runde Querschnitt des Ausgangsmaterials in eine rechteckige Form mit Walzkanten übergeht. Dementsprechend stellt sich in der Richtung senkrecht zum Walzen eine bedeutende Querschnittsveränderung ein. Das Ausmaß dieser Anisotropie ist im ersten Schritt am größten; bei wiederholten Walzvorgängen wird lediglich eine Dickenreduzierung ohne Querschnittsveränderung angestrebt. Der Einfluss

Legierung	Anteile [Masse-%]	Dichte [g/cm ³]	Spez. Widerstand [$\mu\Omega \text{ cm}$]	Verwendung
CuMnAl	84:12:4	8,0	50	Präzisionsmesswiderstände, Shunts, Relaiskontakte, Low-weight Heizwiderstände
CuNi	55:45	8,9	49	Präzisions- und Messwiderstände, Schiebe- und Heizwiderstände
Ni(AlMnSi)	95:5	8,6	27	Temperaturmessung
NiCr	80:20	8,3	108	Korrosions- u. zunderfeste Heizdrähte, Heizkordeln, Wärmekabel
Cu	>99,9	8,9	1,7	Sehr vielfältig!

Tabelle 1: Übersicht über Zusammensetzung und Verwendung der untersuchten Metalllegierungen

	Max. Spannung [N/mm ²]		Änderung [%]	Bruchdehnung [%]		Änderung [%-Punkte]
	0	max.		0	max.	
Walzgrad	0	max.		0	max.	
CuMnNi	799,9	394,1	- 49,3	3,4	73,0	+69,6
CuNi	176,9	844,7	+ 377,5	55,2	3,8	-51,4
NiCr	1079,1	1348,9	+ 24,9	52,5	3,4	-49,1
Ni(AlMnSi)	546,9	950,8	+ 73,9	59,3	2,2	-57,1

Tabelle 2: Übersicht über maximale Zugspannung und Bruchdehnung sowie deren prozentuelle Veränderung in Folge der Verfestigung durch das Flachwalzen

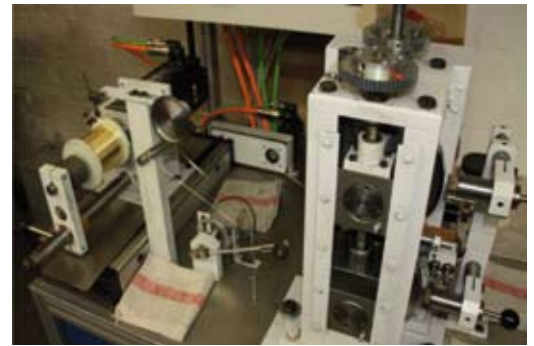


Bild 2: Walzanlage (Foto: Fa. Haarländer GmbH, Roth)

mikroskopischer Effekte nimmt mit kleinen werdenden Dicken stetig zu [4]. Die verwendeten Walzprodukte wurden mit einer Anlage gemäß Bild 2 hergestellt (vgl. Bild 2).

Mechanische Eigenschaften: Abhängigkeit der Zugfestigkeit pro Fläche vom Grad des Walzens

Mit Hilfe der Zugprüfung – hier mittels einer Z010/TH2 Zugprüfmaschine der Fa. Zwick – kann auf vergleichsweise einfache Weise eine ganze Reihe mechanischer Eigenschaften einer Probe ermittelt werden [5], [6]. Die Probe wird mit Hilfe von Spannbacken (jeweils l = 100 mm) auf eine Länge von 50 mm eingespannt und mit einer Geschwindigkeit von 10 mm/min abgezogen [7].

Bild 3 zeigt die maximale Zugkraft (auch Zugfestigkeit) in Abhängigkeit des Umformgrades für verschiedene Metalllegierungen.

Anhand dieser Darstellung erkennt man, dass die maximale Zugkraft mit Ausnahme der Legierung CuMnNi mit dem Walzgrad zunimmt. Folglich verfestigt sich die Probe erheblich. Dies wird zusätzlich dadurch plausibel, dass die Querschnittsfläche mit zunehmenden Walzgrad geringer wird. Tabelle 2 zeigt zusammenfassend die maximale Spannung und daraus abgeleitete Größen für verschiedene extreme Walzgrade. Auch die Bruchdehnung der Probe wird durch das Kaltumformen

durch Flachwalzen erheblich verändert. Bild 4 zeigt die Abhängigkeit der Bruchdehnung vom Walzgrad.

Zur Erklärung dieser Beobachtungen wird das Modell der Kristallstruktur herangezogen. Festkörper setzen sich aus bereichsweise regelmäßig angeordneten Atomen zusammen (sog. Mischkristalle). In Folge dieser Kristallinität findet man Kristallebenen, die eine Verformung durch ein Gleiten entlang dieser Ebenen möglich machen. Formt man einen Festkörper massiv um, so lassen Spannungen in seinem inneren Defekte entstehen; zudem setzt die Bewegung der Atomfronten nicht gleichzeitig ein. Diese beiden Mechanismen bewirken Verzerrungen in der Periodizität des Kristallgitters („Versetzungen“). Derartige Verzerrungen stören das Gleiten der Kristallebenen aneinander und verändern auf diese Weise die Antwort auf Umformvorgänge [8]. Einzig die Legierung CuMnNi zeigt ein völlig konträres Verhalten. Dieses lässt sich mit den vorliegenden Messergebnissen nicht schlüssig erklären. Die Zugfestigkeit wird vergrößert. Analog können die Erkenntnisse auf den Einfluss des Walzgrads auf die Bruchdehnung erklärt werden.

Metallographische Querschliffe zur Charakterisierung des Gefüges und der Geometrie

Metallographische Methoden werden immer dann verwendet, wenn Eigenschaf-

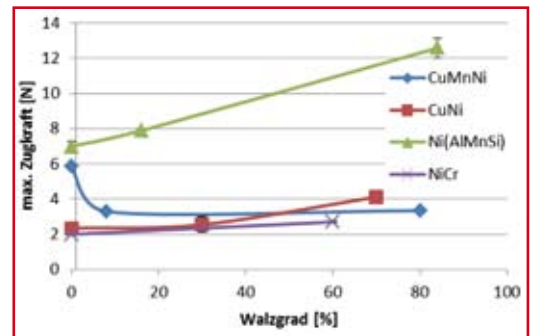


Bild 3: Abhängigkeit der maximalen Zugkraft (Zugfestigkeit) in Abhängigkeit des Walzgrades. Unter dem Walzgrad wird hier das Verhältnis der Dicke des Materials nach dem Walzen und dem Durchmesser des ursprünglichen Runddrahtes verstanden.

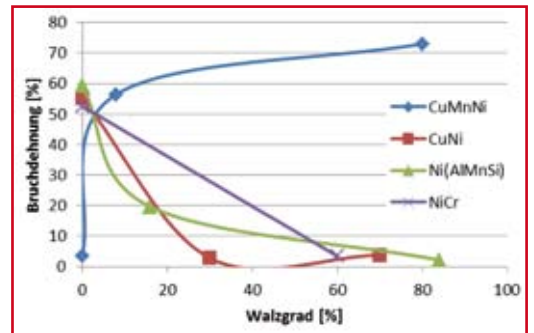


Bild 4: Abhängigkeit der Bruchdehnung in Abhängigkeit des Walzgrades. Unter dem Walzgrad wird hier das Verhältnis der Dicke des Materials nach dem Walzen und dem Durchmesser des ursprünglichen Runddrahtes verstanden.

Bearbeitung	Trennblatt	Schleifpapier	Partikel	Poliertuch	Zeit [min]	Umdrehung [1/min]
Trennen	Bornitrid niedrige Konz.					
Schleifen 1		SiC 46 µm Körnung			1,5	300
Schleifen 2		SiC 26 µm Körnung			1,5	300
Polieren 1			3 µm Diamantsuspension	Mittelharte Kunststeide	3	150
Polieren 2			0,06 µm kolloidales Siliziumdioxid	Poröse, weiche Synthetikfaser	3	<150

Tabelle 3: Übersicht über die Präparationsweise der Schlibfbilder



Bild 5: Veränderung der Geometrie in Abhängigkeit des Umformgrades. Links Ausgangsmaterial (1.000fach), Mitte 30% gewalzt (2.000fach) und rechts 70% gewalzt (1.000fach)



Bild 6: Bezeichnungen zur Beschreibung der Walzprodukte

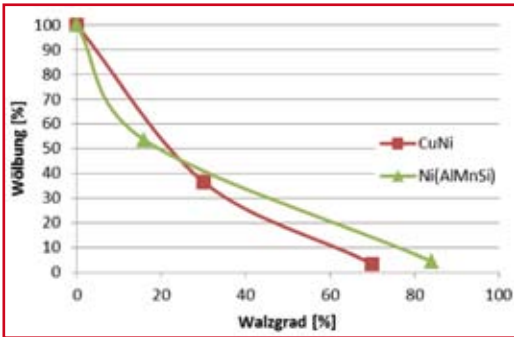


Bild 7: Abhängigkeit des Wölbungsanteils vom Walzgrad. Nach etwa 70% Umformung liegt der Wölbungsgrad für diese Legierungen bei etwa 5%, sodass der Querschnitt der Walzprodukte einem 95-prozentigen Rechteck gleicht.

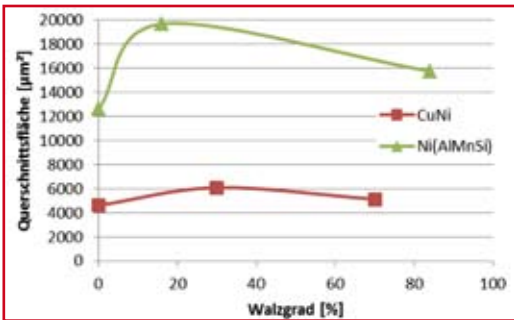


Bild 8: Abhängigkeit der Querschnittsfläche vom Walzgrad

ten des Querschnitts bzw. einer Ebene im Inneren des Materials von Interesse sind. Typischerweise werden insbesondere Fragestellungen an Geometrie und Gefüge mit dieser Methodik beantwortet.

Mit Hilfe eines Kalteinbettmittels auf Methylmethacrylat-Basis sind die Muster im Drucktopf fixiert worden [9]. Tabelle 3 zeigt die Bearbeitung bis zum fertigen Schlibbild. Größte Herausforderung war in Folge der sehr feinen Geometrie dabei die Fixierung der Proben.

Am Beispiel CuNi 55:45 ist in Bild 5 die Veränderung der Geometrie des Leitermaterials gezeigt.

Anhand dieser Schlibbilderreihe lassen sich zwei charakteristische Merkmale des Prozesses Flachwalzen erkennen:

- Im ersten Fertigungsschritt ändert sich die Form der Querschnittsgeometrie völlig. Aus einem kreisrunden Querschnitt wird eine Form, die sich aus einem Rechteck mit zwei sich anschließenden Wölbungsflächen beschreiben lässt. Die Dicke d_{ges} des Walzprodukts ist dabei kleiner, die Breite b_{ges} des Walzprodukts größer als der Durchmesser des ursprünglichen Drahtes (s. Bild 6).
- In jedem weiteren Fertigungsschritt erfährt die Querschnittsgeometrie keine völlige Veränderung ihrer Form mehr. Einzig die Dicke des Walzprodukts wird in diesen weiteren Schritten zusätzlich reduziert, die Breite hingegen nur leicht erhöht.

Tabelle 4 fasst diese geometrische Auswertung für die Legierungen CuNi und Ni(AlMnSi) zusammen.

Ein erstes interessantes Phänomen ist in der Abhängigkeit des Wölbungsanteils vom Umformgrad zu sehen. Bei der untersuchten CuNi-Legierung lassen sich schon nach 30 % Umformung (d.h. es gilt $d_{Walzprodukt} = (1 - 0,3) d_{Runddraht}$) etwa 75 % der Gesamtquerschnittsfläche durch ein Rechteck mit maximal möglicher Breite überdecken; bei einem Umformgrad von 70 % nimmt dieser Anteil schon auf rund 97 % zu. Durch die grafische Auftragung in Bild 7 wird klar, dass sich die Ni(AlMnSi) Legierung sehr ähnlich verhält.

Auch die Veränderung des Betrags der Querschnittsfläche in Folge der Umformung genügt einem interessanten funktionalen Zusammenhang (vgl. Bild 8).

Durch Vergrößerung des Umformgrades (d.h. Reduzierung der Dicke des Walzprodukts) nimmt die Querschnittsfläche zunächst erheblich zu. Die Querschnittsfläche der CuNi-Legierung nimmt bei einem Umformgrad von 30 % um etwa 32 % zu; die Flächenzunahme der Ni(AlMnSi)-Legierung ist mit einer relativen Zunahme von etwa 56 % bei einem Umformgrad von nur 16 % wesentlich stärker. Vergrößert man den Umformgrad noch weiter, so bleibt der Querschnitt gegenüber dem ursprünglichen Drahtquerschnitt zwar erhöht. Im Vergleich zu den geringeren Umformgraden sind die Querschnittsflächen von CuNi um 16 % und von Ni(AlMnSi) um rund 20 % kleiner. Mit dem in Abschnitt 3 bereits verwendeten Modell der Versetzungen kann auch dieser Effekt erklärt werden. Durch das Flachwalzen des Runddrahtes treten Strukturdefekte auf. Diese Defekte stören die Periodizität des Kristalls und reduzieren entsprechend die Packungsdichte des Kristalls. Bleibt die Atomanzahl konstant, so muss sich der mittlere Abstand zwischen zwei Atomen vergrößern. Konsequenterweise nimmt die Querschnittsfläche zu.

Bei stärkerem Flachwalzen lassen sich die Erkenntnisse durch Ausheilungseffekte erklären. Den Atomen der Walzprodukte

Legierung	Umformgrad [%]	Durchmesser [µm]	Dicke d_{ges} [µm]	Breite b_{ges} [µm]	Fläche A_{RE} [µm ²]	Fläche $A_{W1} + A_{W2}$ [µm ²]	Gesamtfläche A [µm ²]	Wölbungsanteil [%]
CuNi	0 (Runddraht)	76,62				4608	4608	100
	30		50,86	102,45	3857	2226	6083	36,6
	70		22,95	222,67	4939	176	5115	3,4
Ni(AlMnSi)	0 (Runddraht)	126,88				12643	12643	100
	16		109,14	141,61	9137	10528	19665	53,5
	84		29,02	533,08	15035	705	15740	4,5

Tabelle 4: Übersicht über verschiedene geometrische Kennwerte für die flachgewalzten Legierungen CuNi und Ni(AlMnSi)

wird durch die Kraft Energie – vor allem in Form von Wärme – zugeführt. Dadurch wird ihre Mobilität erhöht, sodass ein Ausheilen wenigstens eines Teils der genannten Defekte einsetzen kann. Mit dem Ausheilen verbunden ist eine Reduzierung des mittleren Atomabstandes und damit einer Abnahme der Querschnittsfläche des Walzprodukts.

Zusammenfassung und Fazit

Im Rahmen dieses Aufsatzes wurden mechanische Aspekte des Flachwalzens von Nischenlegierungen beleuchtet. In Abhängigkeit des Umformgrades sind mit der Zugfestigkeit und der Bruchdehnung zwei klassische mechanische Kenngrößen ermittelt worden. Besonders die diskutierten geometrischen Effekte wie die Zunahme des rechteckigen Charakters der

Walzprodukte mit dem Umformgrad und der Zusammenhang der Querschnittsfläche mit dem Umformgrad der Drähte ist besonders interessant. Im weiteren Verlauf des Projekts sollen auch elektrische Eigenschaften in derartigen Abhängigkeiten ermittelt werden.

Literatur

- [1] Wilhelm Mehl: Die leonische Drahtindustrie. In: M. Düttmann und S. Sensen: Draht - Vom Kettenhemd zum Supraleiter. Hans- Herbert-Mönnig Verlag Iserlohn. 1. Auflage 2001
- [2] Haarländer GmbH: Conductors, Braids and Special Products made of Copper Wire. Firmenbroschüre 2010.
- [3] H. Oettel und H. Schumann: Metallografie. Wiley-VCH Verlag Weinheim. 15. Auflage 2011
- [4] K. van Putten: Size Effects on the Rolling of small and thin microstrip determined by wire flat rolling and plane strain compression Experiments. Dissertation im Shaker Verlag Aachen. 2008

- [5] B. Heine: Werkstoffprüfung – Ermittlung von Werkstoffeigenschaften. Hanser Verlag Leipzig. 2. Auflage 2011
- [6] Technisches Handbuch Material- Prüfmaschine Z10/TH2A. Zwick GmbH & Co., 89079 Ulm. Stand Oktober 1998
- [7] DIN EN ISO 6892-1
- [8] E. Hornbogen und H. Warlimont: Metalle. Struktur und Eigenschaften der Metalle und Legierungen. Springer Verlag Berlin. 5. Auflage 2006.
- [9] G.F. Vander Voort: SumMet – The Science Behind Materials Preparation. Buehler GmbH, Düsseldorf. 3. (deutsche) Auflage 2011.

(1) *Dipl.-Phys. Johannes Nachtrab, Dr. Frank Beuscher, LEONI Bordnetz-Systeme GmbH, R&D Advanced Engineering*

Berührungsfreie Geschwindigkeitsmessung für Kupferanwendungen

In Prozesslinien, wie Walzwerken, Bandanlagen oder in Rohrstraßen gehört die Erfassung von Geschwindigkeit und Länge heute zu den Standardmessaufgaben.

Stand der Technik sind nach wie vor inkrementale Geber, die aber den Nachteil haben, dass zur Reduzierung des Schlupfes eine entsprechende Andruckkraft oder bei Band- und Folienanwendung eine Mindestumschlingung der Geberwalze vorhanden sein muss. Kupferoberflächen sind oft hochglänzend und müssen meist höchsten Qualitätsansprüchen genügen. Hier bieten sich deshalb berührungsfreie Verfahren an, die aus der Distanz die Bewegung des Materials erfassen, und somit trägheitslos und schlupffrei arbeiten.

Präzision und hohe Dynamik sind die herausragenden Merkmale der ASCOSpeed®-Technologie, Basis einer in vielen Anwendungen bewährten Familie von Geschwindigkeits- und Längenmessgeräten aus dem Hause Micro-Epsilon.

Diese Technik erfährt nun weitere leistungsfähige Erweiterungen. Ausgelegt für

Geschwindigkeiten von max. 3.000 m/min bietet der Sensor selbst für den Einsatz in Folienwalzgerüsten und Hochgeschwindigkeitsschneidlinien noch genügend Leistungsreserven.

Ein Temperaturdatenrekorder – jetzt Bestandteil jedes Gerätes, kann selbst im ausgeschalteten Zustand eine unzulässige Gerätetemperatur registrieren und diese dann beim nächsten Einschalten als Fehler an die Steuerung melden. Damit reagiert man vorbeugend auf die Anwendungen in Prozess- und Ofenlinien mit Materialtemperaturen oberhalb 70 °C und erkennt die Gefahr einer Überhitzung der Messtechnik durch die Abwärme der Bänder oder Rohre rechtzeitig. Ein ebenfalls zum Leistungsumfang gehörender Histogrammspeicher gestattet es, die Temperaturbelastung statistisch zu erfassen und zu bewerten. Damit kann gleichzeitig die Gerätekühlung optimiert werden.

Ein weiteres Leistungsmerkmal ist die Setup-Tabelle, die es ermöglicht, bis zu zehn unabhängige Gerätekonfigurationen im Gerät selbst zu hinterlegen. Dafür gab es bereits Anerkennung von Instandhaltungsteams. Diese können nun die Ersatzgeräte im Magazin reduzieren, benötigen nur noch das Gerät mit dem höchsten Ausrüstungsstandard und die anlagenspezifischen Parameter im zugeordneten Setup. Das spart Zeit und Geld.

Im Rahmen von Modernisierungen nutzen viele Anlagenbetreiber die Leistungsfähigkeit des ASCOSpeed® zur Erhöhung der Betriebssicherheit in der Produktion.



ASCOSpeed® Geschwindigkeitssensor

Foto: MICRO-EPSILON Optronie GmbH