kupfer_

Informationsdruck i.34

Technische Oberflächen unbeschichteter Bänder aus Kupfer und Kupfer-legierungen für elektrische und elektronische Anwendungen



Herausgeber:
Kupferverband e.V.
Emanuel-Leutze Straße 11
40547 Düsseldorf
Telefon +49 211 239469-0
Telefax +49 211 239469-10
info@kupfer.de
kupfer.de

Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks und
der fotomechanischen oder elektronischen Wiedergabe, vorbehalten.
© 2026

1. Auflage 11/2026

Erarbeitet von:

Barbara Biegler	Wieland-Werke AG
Christian Blecking	Kupferverband e.V.
Dr. Rolf Buenten	Schwermetall Halbzeugwerk GmbH & Co. KG
Artur Bukmaier	Sundwiger Messingwerk GmbH
Dr. Andreas Frehn	Materion Brush GmbH
Robert Gross	Gebr. Kemper GmbH + Co. KG
Dr. Holger Justinger	Gebr. Kemper GmbH + Co. KG
Dr. Ulrich Lorenz	Sundwiger Messingwerk GmbH
Thorsten Weireter	Wieland-Werke AG
Albert Rumbach	KME Germany
Dr. Björn Reetz	Materion Brush GmbH
Dr. Bianca Schubert	Kupferverband e.V.
Dr. Ladji Tikana	Kupferverband e.V.
Patrick Wirtz	Schwermetall Halbzeugwerk GmbH & Co. KG
Dr. Robert Zauter	Wieland-Werke AG



Technische Oberflächen unbeschichteter Bänder aus Kupfer und Kupfer-legierungen für elektrische und elektronische Anwendungen

Inhaltsverzeichnis

Vorwort 5

1 Herstellungsprozess 6

1.1 Urformen – Schmelzen und Gießen 6

1.2 Wärmebehandlung – Erwärmung des Gussblocks bzw. der Bramme 7

1.3 Umformung am Beispiel des Warmwalzens 7

1.4 Mechanische Oberflächenbearbeitung 7

1.5 Umformung – Kaltwalzen als Zwischen- oder Fertigwalzen 8

1.6 Wärmebehandlung –Bandglühung, Einstellung der Gefügestruktur/Festigkeit 8

1.7 Oberflächenbehandlungen 8

1.8 Streckbiegerichten 9

1.9 Längsteilen 9

2 Oberflächenzustände 10

2.1 Allgemeine anwendungs-unabhängige Merkmale 10

2.1.1 Technisch blanke Oberflächen – Unterschiede, die zählen 10

2.2 Anwendungsspezifische Oberflächenzustände 11

2.2.1 Bänder für nicht-federnde Kontakte und federnde Steckverbinder 12

2.2.2 Bänder für Halbleiteranwendungen 12

2.2.3 Bänder zu Plattierzwecken 14

2.2.4 Bänder für späteres Galvanisieren 14

3 Abnahmerelevante Prüfverfahren 15

3.1 Oberflächeninspektion 15

3.1.1 Grundlagen 15

3.1.2 Sichtprüfung mit geschultem Personal 15

3.1.3 Automatische Oberflächen-inspektionssysteme (OIS) 16

3.1.4 Einsatz von KI bei der Oberflächeninspektion 16

3.2 Rauheitsmessung 17

3.2.1 Taktile Rauheitsmessung 17

3.3 Reibung und Verschleiß: Kugelreibtest 17

4 Technologische Prüfverfahren: Löttest 18

5 Chemische und physikalische Oberflächeneigenschaften 19

5.1 Tintentest 19

5.2 Kontaktwinkelmessung 19

5.3 Analyse des Restkohlenstoffgehalts 20

5.4 Klimatest 20

6 Literatur 22

_ Vorwort

Walzprodukte – und insbesondere Bänder aus Kupferwerkstoffen – sind in nahezu allen industriellen Bereichen unverzichtbar. Sie bilden das Ausgangsmaterial für eine Vielzahl von Komponenten, die unsere moderne Welt am Laufen halten: von winzigen elektrischen Kontakten und Konnektoren bis hin zu großflächigen Wärmeüberträgern, architektonischen Fassaden oder Hochleistungsbauteilen in der Elektromobilität. Bevor diese Werkstoffe ihr endgültiges Maß und ihre spezifische Funktion erreichen, werden sie in der Regel mehrfach weiterverarbeitet – durch u.a. Umformen, Stanzen, Texturieren, Beschichten oder Fügen.

In all diesen Prozessen spielt die Qualität der Oberfläche eine entscheidende Rolle. Sie beeinflusst nicht nur das ästhetische Erscheinungsbild, sondern vor allem auch die technische Leistungsfähigkeit der späteren Bauteile. Faktoren wie Rauheit, Gefüge, Werkstoffzustand und Bearbeitungsspuren wirken sich unmittelbar auf die weitere Verarbeitbarkeit, elektrische Leitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit aus. Da eine Vielzahl von Parametern – von den Walzbedingungen über die verwendeten Werkzeuge bis hin zu Schmierstoffen und Reinigungsprozessen – in dieses komplexe Zusammenspiel hineinwirken, ist das Verständnis der Oberflächenqualität eine zentrale Aufgabe in der Fertigung.

Die vorliegende Broschüre widmet sich genau diesem Themenfeld. Sie richtet sich an Studierende, Forschende, Ingenieurinnen und Ingenieure, Bauteildesigner sowie Fachleute aus der Fertigung, die sich mit Kupferwerkstoffen und ihren Oberflächeneigenschaften beschäftigen. Angesprochen sind sowohl Interessierte, die einen ersten Überblick über die Grundlagen gewinnen möchten, als auch erfahrene Anwender, die ihr Wissen vertiefen und Zusammenhänge zwischen Prozessführung und Werkstoffverhalten besser verstehen wollen.

Unser Ziel ist es, die wichtigsten Einflüsse auf die Oberflächenqualität gewalzter Produkte aus Kupfer und Kupferlegierungen verständlich zu beschreiben, praxisnah zu veranschaulichen und den Blick für die Wechselwirkungen zwischen Werkstoff, Prozess und Produkt zu schärfen. Damit soll die Broschüre nicht nur als Einführung dienen, sondern auch als Nachschlagewerk und Impulsgeber für die Weiterentwicklung bestehender Fertigungsprozesse und Qualitätsstrategien.

1 _ Herstellungsprozess

Die zur Herstellung von Bändern genutzten Fertigungsschritte (Abbildung 1) beeinflussen deren Oberflächenzustand. Deshalb soll im Folgenden kurz auf ausgewählte gängige Fertigungsschritte eingegangen und deren jeweiliger Einfluss auf die Oberfläche aufgezeigt werden.

1.1 Urformen – Schmelzen und Gießen

Das Schmelzen dient der Herstellung der gewünschten Legierung durch den Einsatz entsprechender Materialien. Neben den eigentlichen Legierungselementen, beispielsweise in Form von Vorlegierungen, Schrotten oder „Neumetallen“, werden hierbei häufig auch Zuschlagstoffe genutzt, die die Eigenschaften der Schmelze (beispielsweise den Anteil gelöster Gase) positiv beeinflussen. Zielgrößen dieses Prozesses sind die chemische Zusammensetzung, die Menge und Temperatur der Schmelze. Sind diese Zielgrößen erreicht, kann der Abguss erfolgen.

Je nach genutztem Gießverfahren, kontinuierlich oder diskontinuierlich, erfolgt der Abguss direkt in eine Kokille oder in einen Zwischenofen. Im Ergebnis entsteht ein Gussstück, das in Form einer Bramme oder eines aufgerollten Gussbandes vorliegen kann und typische Strukturen im oberflächennahen Bereich aufweist, die in der Regel im Zuge der weiteren Bearbeitung komplett entfernt werden müssen. Zu diesen Strukturen zählen u. a. Oxidschichten, Poren, Blasen, Seigerungen, Unebenheiten, Risse und Einschlüsse.

1.2 Wärmebehandlung – Erwärmung des Gussblocks bzw. der Bramme

Die Wärmebehandlung dient vor allem der Einstellung der Walztemperatur. Sie ermöglicht unter anderem auch den Abbau von Mikroseigerungen, kann jedoch auch für eine Gefüge-Komplettumwandlung genutzt werden. Da als Glühaggregate hier hauptsächlich Hubbalkenöfen (für die Behandlung von Brammen für das anschließende

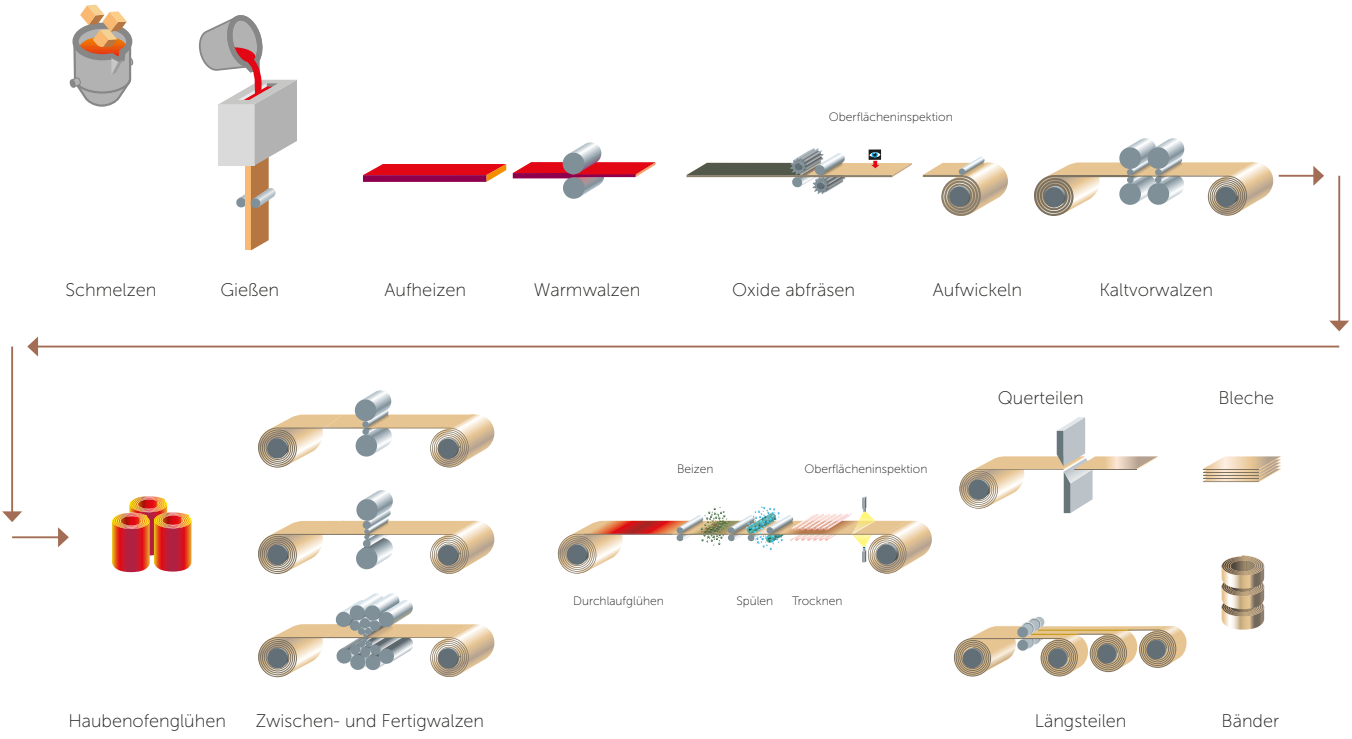


Abbildung 1: Schematischer Prozessablauf zur Herstellung eines Bandes

Warmwalzen) bzw. Haubenöfen (für Gussbänder) zum Einsatz kommen, betragen die Glühzeiten mehrere Stunden. In Abhängigkeit von der gewählten Glühraumatmosphäre (je nach Legierung kann „oxidierend“, „neutral“ oder „reduzierend“ vorteilhaft sein) können im Zuge dieser Wärmebehandlung Oxidschichten auf der Gussstückoberfläche verstärkt oder reduziert werden.

1.3 Umformung am Beispiel des Warmwalzens

Das Warmwalzen dient hauptsächlich dem Ziel, die Ausgangsbanddicke (beispielsweise 260mm) innerhalb weniger Walzstiche auf eine möglichst geringe Zwischenbanddicke (beispielsweise 25mm) zu bringen. Aufgrund der hohen Temperatur beim Warmwalzen verursacht die Umformung hierbei nur geringere Festigkeitsveränderungen beim Walzgut gegenüber der Ausgangsbramme. Im Zuge dieses Bearbeitungsschrittes entstehen Oxid- bzw. Zunderschichten (Abbildung 2), die im späteren Verlauf entfernt werden müssen, damit die Oberflächenqualität des späteren Fertigbandes nicht negativ beeinflusst wird.

1.4 Mechanische Oberflächenbearbeitung

Dieser Bearbeitungsschritt dient der Entfernung des oberflächennahen Bereiches, der noch unvermeidbare Strukturen des Gießprozesses, der Wärmebehandlung und gegebenenfalls des Warmwalzprozesses enthält, und damit der Schaffung einer technisch blanken Oberfläche mit sichtbarem Fräsmuster (Abbildung 3). Im Zuge dieses Bearbeitungsschrittes können jedoch unerwünschte Oberflächenstrukturen (beispielsweise Fehler durch Späne, Fräswerkzeuge) entstehen, die die Oberflächenqualität des späteren Fertigbandes beeinflussen [1].



Abbildung 2: Beispiel einer oxidierten Oberfläche nach dem Warmwalzvorgang

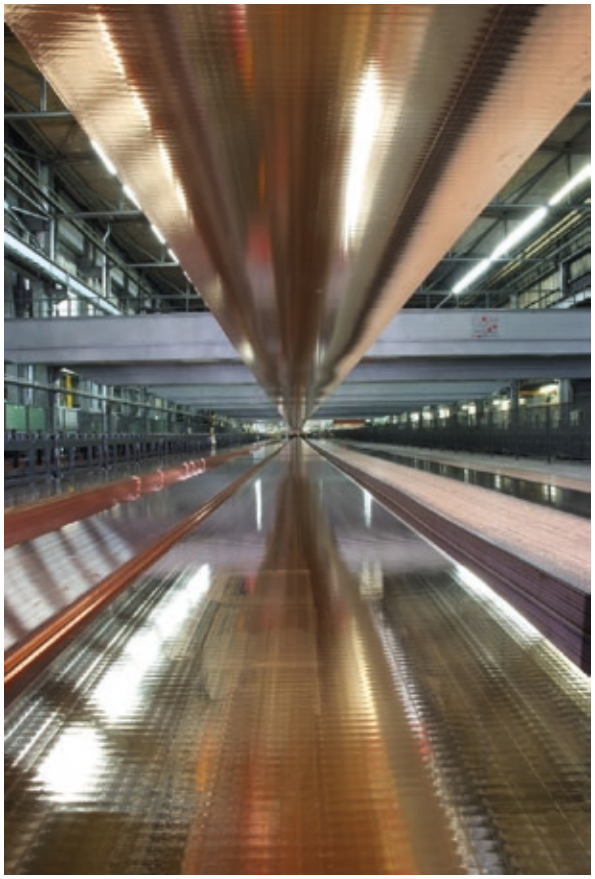


Abbildung 3: Beispiel einer blanken Oberfläche mit sichtbarem Fräsmuster

1.5 Umformung – Kaltwalzen als Zwischen- oder Fertigwalzen

Das Kaltwalzen dient dem Ziel der Banddickenreduktion, wobei die Festigkeit des Bandes ansteigt. Der Spezialfall des Fertigwalzens zielt darüber hinaus auch auf die Einstellung der gewünschten (kundenspezifischen) Banddicke, der Materialkennwerte und der Rauheitskennwerte ab. Die Rauheitskennwerte entstehen durch Interaktion zwischen Walzgut, Öl/Emulsion und Oberflächenstruktur der Arbeitswalzen (Walzenschliff). Das hierbei zum Einsatz kommende Walzöl bzw. die Walzemulsion dient dem Schutz von Walzen und Walzgut voreinander, der Wärmeabfuhr und dem Schutz vor Oxidation. Im Zuge dieses Bearbeitungsschrittes können jedoch unerwünschte Oberflächenstrukturen (beispielsweise Walznarben, Einwalzungen) entstehen, die die Oberflächenqualität des späteren Fertigbandes beeinflussen. Das Vorhandensein von Walzöl bzw. Emulsion auf der Oberfläche kann Einflüsse auf spätere Prozesse haben.

1.6 Wärmebehandlung – Bandglühung, Einstellung der Gefügestruktur/Festigkeit

Dieser Bearbeitungsschritt dient der gezielten Beeinflussung der Gefügestruktur (z.B. Einstellen einer bestimmten Härte/Festigkeit) oder der Bildung/Auflösung von Ausscheidungen im Material (z.B. bei aushärtbaren Kupferwerkstoffen). Dadurch werden die Bandeigenschaften beeinflusst. Da als Glühaggregate hier neben Haubenöfen auch Durchlauföfen zum Einsatz kommen, variieren die Glühzeiten zwischen mehreren Stunden im Haubenofen und wenigen Sekunden im Durchlaufofen. In Abhängigkeit von der gewählten Glühraumatmosphäre (in den meisten Fällen kommen hier Schutzgase wie z.B. Stickstoff oder Wasserstoff oder deren Mischungen zum Einsatz) können im Zuge dieser Wärmebehandlung trotzdem dünne Oxidschichten auf der Bandoberfläche auftreten, die das Aussehen, die Verarbeitbarkeit (Werkzeugstandzeit bei Schneid- oder Stanzoperationen) und die Beschichtbarkeit beeinflussen.

1.7 Oberflächenbehandlungen

Zu den Oberflächenbehandlungen zählen u.a. Entfetten, Beizen, Bürsten und Passivieren. Ein Entfettungsprozess dient der Entfernung von Walzölen oder Walzemulsionen (aus vorherigen Fertigungsschritten) von der Bandoberfläche und bereitet die Oberfläche somit für gegebenenfalls folgende Beiz- oder Beschichtungsoperationen vor. Der Entfettungsprozess erfolgt chemisch/mechanisch und/oder elektrochemisch. I. d. R. schließen sich an den Entfettungsprozess auch Spül- und Trocknungsprozesse an.

Dünne Oxidschichten können im Zuge eines Beizprozesses chemisch und elektrochemisch entfernt werden. Durch den Einsatz oxidierend-reduzierender Chemikalien ist, falls erforderlich, ein stärkerer Oberflächenabtrag möglich.

Ein Bürstprozess dient als mechanische Oberflächenbehandlung der Reinigung der Bandoberfläche (Abtrag von chemisch nicht gebundenen Oberflächenbelägen) bzw. dem Abtrag der Oberfläche durch abrasiv wirkende Bürsten. Abrasiv wirkende Bürsten beeinflussen die Oberflächenbeschaffenheit (Rauheitskennwerte) des Bandes.

Zum Schutz der Bandoberfläche kommen je nach Anforderung Passivierungsmittel (beispielsweise Benzotriazol – BTA) zum Einsatz. Passivierungsmittel reduzieren die Auftrittswahrscheinlichkeit von Oxidations- und/oder Korrosionseffekten, müssen jedoch vor einem gegebenenfalls später folgenden Beschichtungsprozess wieder entfernt werden.

Im Zuge einer Oberflächenbehandlung können jedoch unerwünschte Oberflächenstrukturen (beispielsweise Flecken) entstehen, die die Oberflächenqualität des späteren Fertigbandes beeinflussen.

Oberflächenbehandlungen werden je nach Bedarfsfall und Möglichkeit einzeln oder kombiniert durchgeführt.

1.8 Streckbiegerichten

Das Streckbiegerichten ist ein optionaler Arbeitsgang, der an mehreren Stellen in der Prozesskette zum Einsatz kommen kann. Ziel ist in der Regel die Verbesserung der Planlage des Bandes, sei es aufgrund geometrischer Vorschriften in Kundenspezifikationen oder um eine gute Weiterverarbeitung in Folgearbeitsschritten, z.B. beim Feuerverzinnen, zu gewährleisten.

Wie bereits der Name sagt, handelt es sich beim Streckbiegerichten um ein Verfahren, das eine Streckung des Bandes mit Wechselbiegungen kombiniert. Das Band wird, unter Zug stehend, durch einen Richtrollensatz geführt. Dabei wird es wechselseitig nach oben und unten gebogen, wodurch lokal ein geringer plastischer Verformungsgrad erreicht wird. Dies führt dazu, dass im Band vorhandene Spannungen umverteilt oder homogenisiert werden, wodurch sich Unebenheiten jeder Art minimieren lassen. Legierungs- und zustandsabhängig wird gegebenenfalls die Streckgrenze leicht erhöht.

1.9 Längsteilen

Das Längsteilen dient dem Herstellen der kundenspezifischen Bandbreite (Abbildung 4). Entsprechend aneinander gereihte Rollenscherenmesser, Distanzscheiben und Auswerfer ermöglichen diesen Prozess. Im Zuge dieses Prozesses können jedoch unerwünschte Oberflächenstrukturen (beispielsweise übermäßiger Schneidgrat, Kantenausbrüche, Kratzer oder zu hohe Umformungen, Verschmutzungen, mechanische Beschädigungen) entstehen, die die Oberflächenqualität des späteren Fertigbandes beeinflussen.

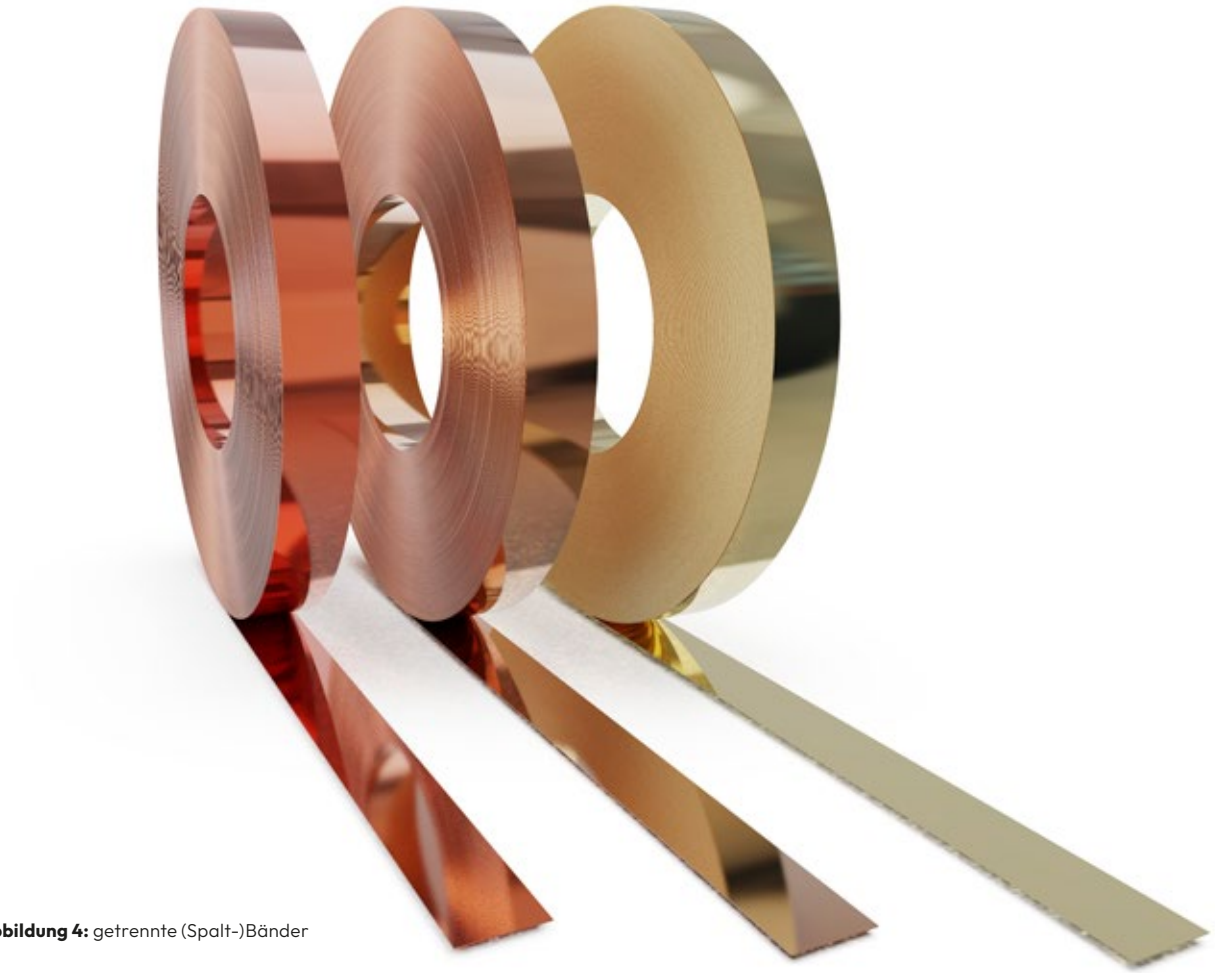


Abbildung 4: getrennte (Spalt-)Bänder

2 _ Oberflächenzustände

2.1 Allgemeine anwendungsunabhängige Merkmale

2.1.1 Technisch blanke Oberflächen – Unterschiede, die zählen

Nachdem der Produktionsprozess von Kupfer- und Kupferlegierungsbändern bereits erläutert wurde, lohnt sich ein genauerer Blick auf die resultierenden Oberflächen. Denn obwohl alle Bänder technisch blank erscheinen, gibt es – abhängig von den eingesetzten Verfahren und Prozessrouten – grundlegende Unterschiede, die für die spätere Anwendung entscheidend sein können.

2.1.1.1 Ölfilm oder fettfrei[1] – was steckt dahinter?

Beim Walzen, Schneiden und Streckbiegerichten von Kupferbändern kommen produktionsbedingt Öle zum Einsatz. Je nach verwendetem Öl sind darin in unterschiedlichen Konzentrationen sogenannte Inhibitoren enthalten, die das Material nach Auslieferung vor atmosphärischer Korrosion schützen. Für den Export, insbesondere nach Übersee, werden in den finalen Produktionsschritten Öle gewählt, die einen geeigneten Korrosionsinhibitor beinhalten, um auch bei den anspruchsvolleren Umgebungsbedingungen einer Verschiffung ausreichend Schutz zu bieten.

Anwendungsbedingt kann es notwendig sein, die aufgebrachte Ölmenge zu minimieren oder diese sogar zu vermeiden bzw. zu entfernen. Ein minimaler Ölfilm ist z.B. dann hilfreich, wenn kleinteiliges Schüttgut produziert wird. Er verhindert das Verkleben der Stanzteile untereinander. Sofern kundenseitig eine fettfreie Oberfläche spezifiziert wird, muss ein Ölfilm aus vorhergehenden Arbeitsschritten gegebenenfalls in einem Zusatz-Arbeitsgang entfernt werden. In der Regel wird die Oberfläche dann entfettet bzw. gebeizt. Es gibt zudem Randbedingungen, die die Auslieferung einer fettfreien Oberfläche unmöglich machen, z.B. sehr enge Vorgaben in den geometrischen Formtoleranzen, die ein Richten in Einzelbreite erfordern. In der Praxis erweist sich eine grobe Einteilung hinsichtlich der Ölmenge (ölig – minimaler Ölfilm – öl- bzw. fettfrei), als ausreichend.

2.1.1.2 Temporärer Korrosionsschutz zur Vermeidung von Oxidation

Während des Produktionsprozesses werden Bänder aus Kupfer und Kupferlegierungen in der Regel mit einem zusätzlichen temporären Korrosionsschutz behandelt. Hierzu werden Inhibitoren auf Triazol-Basis eingesetzt, z.B. Benzotriazol (kurz: BTA) oder Tolyltriazol (kurz TTA). Der Inhibitor chemisorbiert als hauchdünne Schutzschicht (Monolage) auf der Bandoberfläche und verhindert dadurch atmosphärische Oxidation. Eine Schutzwirkung vor sichtbarer Oxidation ist, je nach Basiswerkstoff und Umgebungsbedingungen und unter der Voraussetzung einer sachgerechten Lagerung, für 6 Monate gegeben.

Wichtig zu wissen: Vor einer galvanischen Weiterverarbeitung muss die fest gebundene Schutzschicht durch eine abtragende Reinigung entfernt werden, da sie sonst die Schichthaftung beeinträchtigen kann. Für Spezialanwendungen, z.B. Walzplattierbänder, wird bewusst auf einen temporären Korrosionsschutz verzichtet, was die Oxidationsanfälligkeit deutlich erhöht. Der Korrosionsschutzverzicht ist jedoch explizit zu spezifizieren.

2.1.1.3 Walz- und Bürststrukturen – sichtbare Spuren der Bearbeitung

Auch optisch hinterlassen die verschiedenen Produktionsschritte ihre Spuren. Im Laufe des fortschreitenden Fertigungsprozesses wird jedes Band mehrfach gebürstet, nach Bedarf auch die Enddicke. Es gibt aber Anwendungen, wo dies nicht zulässig ist, z.B. bei dünnen Systemträgern. Die Bürstung überlagert die ursprüngliche Walzstruktur, bleibt aber in ihrer Ausrichtung längs zur Walzrichtung (Abbildung 5).

Die Rauheit der Oberfläche wird jedoch primär durch den beim Walzen eingesetzten Walzenschliff bestimmt. Das Bürsten verändert den arithmetischen Mittenrauwert Ra in der Regel nicht.

Zum Einsatz kommen verschiedene Bürstentypen, die charakteristische Bürststrukturen auf der Bandoberfläche erzeugen. Sie werden meist abhängig von der

1 Fettfrei ist zwar gebräuchlich, jedoch technisch nicht korrekt, da absolut gesehen immer Spuren messbar sind. Außerdem werden Öle eingesetzt und keine Fette.



Abbildung 5: Stark gebürstete Oberfläche mit Bürststrukturen

gewünschten Reinigungswirkung oder Bürststruktur gewählt und unterscheiden sich vornehmlich im Besatz: Es gibt sowohl Haarbürsten mit Borsten als auch Bürsten mit Lamellenvlies. Die Bürstwirkung und die resultierende Oberflächenstruktur unterscheiden sich je nach eingesetzter Faserdicke, Festigkeit, Schleifzusatz und Schleifkorngröße.

2.1.1.4 Reinigung bei Löttest-Vorgaben – ein unsichtbarer, aber entscheidender Schritt

Obwohl nicht direkt sichtbar, spielt die Reinigung eine zentrale Rolle – insbesondere bei Anwendungen, die einen Löttest erfordern. Je nach Vorgabe kommen unterschiedliche Verfahren zum Einsatz, etwa Beizbehandlungen in verschiedenen Säuren oder mechanisches Bürsten. Diese Anforderungen sind stark anwendungsspezifisch und nur bedingt auf Bänder übertragbar, denn entsprechende Normen zur Lötbarkeitsprüfung wie die DIN EN IEC 60068-2-20:2020-09 [6] beziehen sich nur auf Bauteile.

2.2 Anwendungsspezifische Oberflächenzustände

Neben allgemeinen Unterschieden, die aus dem Prozessablauf stammen, gibt es weitere Oberflächenparameter, die passend zum konkreten Anwendungsfall eingestellt werden können. Hierzu zählen messbare ebenso wie optische Merkmale und Materialungänzen.

Die vorliegende Broschüre konzentriert sich auf Oberflächen für elektrische und elektronische Anwendungen und hier insbesondere auf Kontakt- und Federband sowie Bänder für Systemträger und Plattierzwecke. Sämtliche anderen Oberflächen, beispielsweise für dekorative oder architektonische Zwecke, werden nicht betrachtet.

Zur Definition der nachfolgend verwendeten Begriffe sei auf das DKI-Merkblatt 100 „Lieferbedingungen für unbeschichtete Bänder aus Kupfer und Kupferlegierungen – Oberflächenbeschaffenheit“ (Stand August 2026) verwiesen [1].

Unabhängig von der späteren Anwendung werden darin bestimmte Materialunregelmäßigkeiten als unzulässig beschrieben. Hierzu zählen Löcher, Blasen, Schalen und

Einwalzungen jedweder Art (metallisch artgleich oder fremd, organisch etc.). Optische Auffälligkeiten wie Streifen, Flecken und sonstige Verfärbungen sind als tolerierbar aufgeführt , sofern die spätere Verwendung nicht beeinträchtigt wird. Im Falle einer nachfolgenden Oberflächenveredelung durch Galvanisieren müssen Verfärbungen durch eine geeignete Vorbehandlung in der Galvanik entfernt werden.

Kriterien zur Unterscheidung verschiedener anwendungsabhängiger Oberflächenzustände beziehen sich in der Regel auf folgende weitere Merkmale:

- arithmetischer Mittenrauwert R_a
- Vorgaben zu vertieften (Eindrücke) oder erhöhten kleineren Fehlern (Walznarben, Materialerhöhungen)
- Längliche und häufig längs ausgeprägte Fehler wie Kratzer oder Riefen

Auf diese Merkmale wird im Folgenden jeweils anwendungsspezifisch Bezug genommen. Informationen zu Vertiefungen und Erhöhungen sind bezogen auf Probenlängen von 1000 mm und die gelieferte Endbreite (Istbreite) oder max. 50 mm.

2.2.1 Bänder für nicht-federnde Kontakte und federnde Steckverbinder

Bänder für Kontakte und Steckverbinder weisen im Allgemeinen einen arithmetischen Mittenrauwert R_a von max. 0,25 µm auf. Eine Einschränkung von R_a auf max. 0,20 µm ist mit Mehraufwand möglich. Dies gilt für Bänder aus allen Kupferwerkstoffen, Ausnahme sind dickere Reinkupferbänder, z.B. für Busbars, für die ein R_a von max. 0,40 µm angewendet wird. Kratzer oder Riefen (längs und quer) sind bis zu einer maximalen Rautiefe Rmax von 4 µm zulässig. Bürststrukturen innerhalb der Oberflächenrauheit R_a sind zulässig.

Erhebungen wie auch Vertiefungen müssen mit bloßem Auge erkennbar sein. Erhebungen, verursacht durch einen Fehler (Vertiefung) auf einer Walze, sind bei Einhaltung der Dickentoleranz unkritisch. Sie werden Walznarben genannt. Für Vertiefungen liefert das DKI-Merkblatt 100 folgende Anhaltswerte: Bis zu einer Banddicke von max. 0,8 mm darf eine Tiefe von 15 µm und eine maximale Anzahl von 15 pro Probe nicht überschritten werden. Bei größeren Banddicken darf die Tiefe max. 30 µm nicht überschreiten bei gleicher Anzahl (max. 15 pro Probe) [1].

2.2.2 Bänder für Halbleiteranwendungen

Bänder für Halbleiteranwendungen sind hinsichtlich der Oberflächenqualität kritischer zu bewerten als Kontakt- und Federband. Dies ist vor allem dem Weiterverarbeitungsprozess geschuldet. In den meisten Fällen werden Bondprozesse durchgeführt, die empfindlich auf Fehler in der Oberfläche reagieren. Auch galvanische dünne Beschichtungen mit Edelmetallen sowie Lasermarkierungen von Heatspreadern stellen hohe Anforderungen dar. Speziell für dünne Halbleiteranwendungen sind neben dem Oberflächenzustand gegebenenfalls weitere spezielle Anforderungen wie Erweichungsbeständigkeit oder ein geringes inneres Spannungslevel zu beachten. Der Marktschwerpunkt dieser Anwendungen liegt derzeit in Asien. Die europäische Norm DIN EN 1758 (Bänder für Systemträger) spiegelt diese Situation nur unzureichend wider. In der industriellen Praxis werden je nach Anwendung und Kundenanforderung zusätzliche Anforderungen wie folgt berücksichtigt.

Bei Halbleiteranwendungen ist es sinnvoll, zwei Banddickenbereiche für verschiedene Hauptanwendungsgebiete zu unterscheiden und diese auch getrennt zu betrachten:

2.2.2.1 ICs und diskrete Bauteile

Systemträger in unterschiedlichen Gehäuseformen[2], z.B. QFN/DFN, QFP, TSOP, SOT und DIP und LEDs verwenden in der Regel dünnere Abmessungen bis max. 0,508 mm (Abbildung 6). Hier wird mit Standarddicken, den sogenannten „mil“-Dicken gearbeitet. Gebräuchlich sind 5 mil (0,127 mm), 6 mil (0,15 mm), 8 mil (0,203 mm) und 10 mil (0,254 mm). Für Bänder, die in diese Anwendungen in die Halbleiterindustrie gehen, ist in der Regel eine Oberflächenrauheit von R_a max. 0,13 µm bei einer maximalen Rautiefe Rmax von max. 1 µm relevant. Aufgrund von typischerweise kleinen Bonddrahtdurchmessern können größere Vertiefungen und Erhebungen kritisch sein und es sind gegebenenfalls spezielle Anforderungen mit dem Kunden zu vereinbaren. In der Praxis wird oft die sogenannte 5-2-5-Regel als Orientierung herangezogen. Diese beschreibt maximale Anzahlen und Ausprägungen von Fehlstellen (interpretiert als bis zu 5 Fehlstellen mit einer Tiefe oder Höhe von 2–5 µm), die ohne Vergrößerung detektierbar sind. Kritisch sind insbesondere wiederkehrende Fehler. Die Probengröße

2 QFN: Quad Flat No-lead, DFN: Dual Flat No-lead, QFP: Quad Flat Package, TSOP: Thin Small Outline Package, DIP: Dual In-line Package

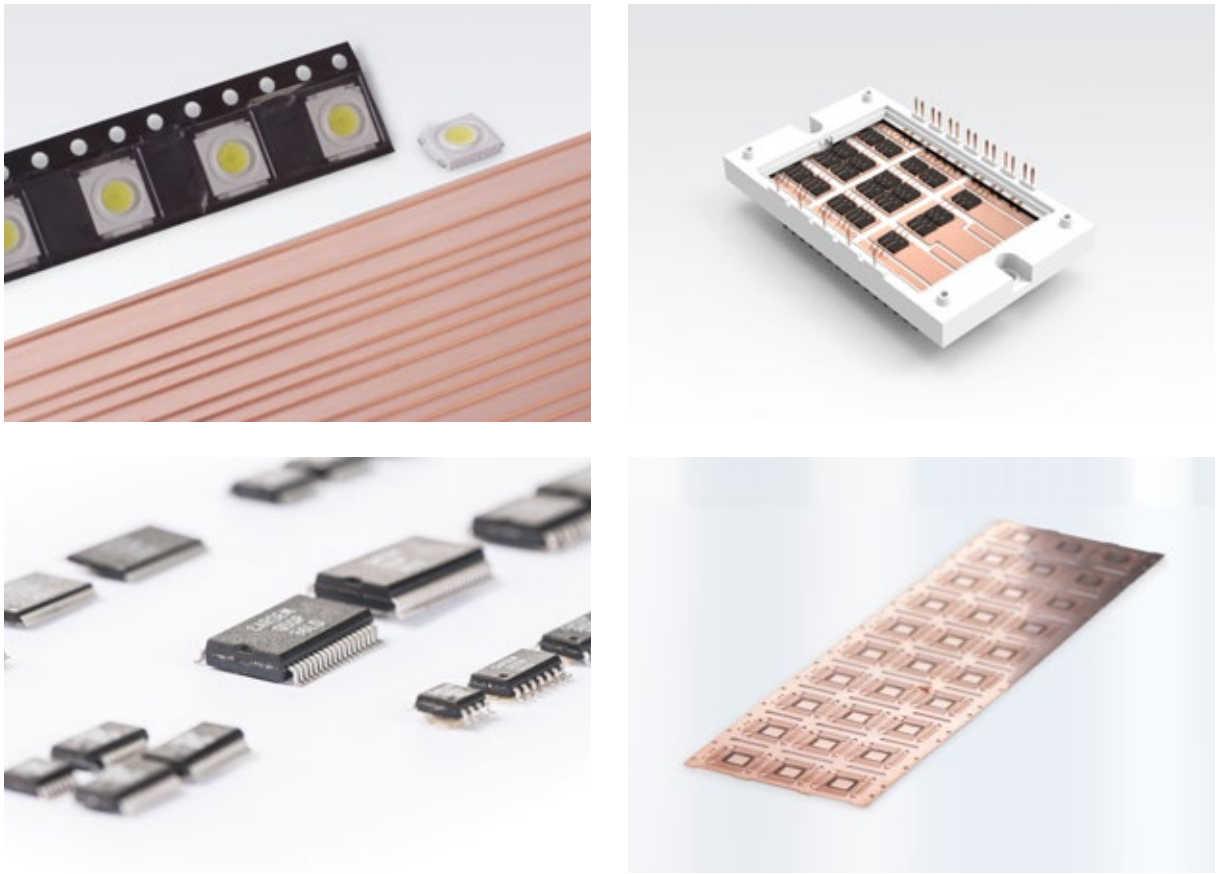


Abbildung 6: Systemträger in unterschiedlichen Gehäuseformen

ist dabei analog zu der im DKI-Merkblatt 100 [1] definiert (Probenlänge 1000 mm, Breite max. 50mm). Da für den Bandhersteller weder eine 100% Kontrolle möglich ist noch eine Differenzierung in funktionelle (Bondzone) und nicht funktionelle Bereiche, führt üblicherweise der Systemträger-Hersteller eine 100% Kontrolle der fertigen Teile durch und sortiert Einzelfehler aus.

Kundenseitig wird meist keine Bürststruktur akzeptiert, sodass solche Bänder nicht an die Enddicke gebürstet werden dürfen. Diese Oberflächenqualität wird im Markt häufig als Leadframe-Qualität bezeichnet. Ausnahmen sind Bürstoberflächen für spezielle galvanische Prozesse.

2.2.2.2 Leistungshalbleiter, Heatspreader und Heatsinks

Transistoren im Standard-Design TO-220/TO-247 oder Bauteile mit flachen Gehäusen/Surface Mount Technologie (DPAK) sowie Heatspreader und Heatsinks (entweder in CPU-Anwendungen oder als Drop-In für IC-Bauteile) verwenden Banddicken von 0,5 – 4,0 mm.

Für Transistoren und Heatspreader ist die Rauheit im Allgemeinen eingeschränkt auf R_a max. 0,16 µm. Für Vertiefungen und Erhebungen wird in der Praxis oft die sogenannte 10-5-10- bzw. die 15-5-10-Regel (banddickenabhängig) herangezogen, interpretiert als max. 10 bzw. 15 Fehlstellen mit einer Tiefe oder Höhe von 5-10 µm. Die Probengröße ist dabei analog zu der in DKI-Merkblatt 100 (Probenlänge 1000 mm, Breite max. 50mm) [1]. Auch hier sind je nach Materialzustand und Dicke die Vereinbarungen mit und für Kunden gegebenenfalls anzupassen.

Eine Besonderheit gilt für Transistoren (TO-220/247). Diese Designs vereinen die Funktionen eines Leadframes mit einem Wärmeableiter (Heatsink) und werden daher oft aus einem Stufenband hergestellt. Stufenband ist über verschiedene Prozesse herstellbar, z.B. über Prägen, Profilwalzen, Skiven, Schälen oder Fräsen. Für gefräste Oberflächen ist nur ein arithmetischer Mittenrauwert R_a von max. 0,20 µm (nicht 0,16 µm) erreichbar; die Oberfläche ist gebürstet.

2.2.2.3 Bänder für Substrate in Hochleistungsmodulen (DCB, AMB)

Hier wird in der Regel reines Kupfer verwendet, typische Dicken liegen zwischen 0,2 – 0,8 mm. Bei den Endkunden wird auf diese Oberflächen ebenfalls gebondet, allerdings werden bei der Substratherstellung in der Regel die ursprünglichen Bandoberflächen durch Ätzen abgetragen. Aufgrund des weicheren Zustandes ist eine Zusage der unter 2 genannten Fehlertiefen nicht möglich, der Fokus liegt stattdessen auf der Vermeidung wiederkehrender Fehler und durchgehender Kratzer außerhalb der Rauheitsvorschrift. Darüber hinaus sind geeignete Maßnahmen zu treffen, um eine gleichmäßige Kornstruktur nach der beim Kunden durchgeführten Hochtemperaturglühung sicherzustellen.

2.2.3 Bänder zu Plattierzwecken

Bänder für Plattierzwecke weisen typischerweise einen arithmetischen Mittenrauwert R_a von 0,20 – 0,80 µm auf. Kratzer oder Riefen sind generell unkritisch. Bürststrukturen innerhalb der Oberflächenrauheit R_a sind tolerierbar.

Erhebungen wie auch Vertiefungen jedweder Art sind grundsätzlich tolerierbar, sofern sie die Plattierbarkeit nicht beeinträchtigen. Einzelheiten sind gegebenenfalls zwischen Kunde und Lieferant zu vereinbaren.

Kritisch beim Plattieren sind alle Phänomene, die zu einer ungenügenden Haftung des aufplattierten Werkstoffs führen können. Hierzu zählen zum einen Ungänzen, bei denen Material nur teilweise mit dem Grundmaterial verbunden ist oder lose aufliegt (z.B. Schalen, Flitter, Einwalzungen). Diese sind nur akzeptabel, wenn sie durch die Vorbehandlung zum Plattieren (z.B. Aufrauen durch starkes Bürsten) entfernt werden können. Zum anderen ist der Reinheitsgrad der Oberfläche zu beachten. Je nach Plattierverfahren wird daher ein maximal zulässiger Wert für vorhandenen Restkohlenstoff zwischen Kunde und Lieferant vereinbart.

2.2.4 Bänder für späteres Galvanisieren

Sofern auf Bandoberflächen eine spätere Veredelung, in der Regel durch Galvanisieren, vorgesehen ist, muss die Oberfläche kundenseitig nach Abstimmung mit dem späteren Galvanikbetrieb bestellt und spezifiziert werden, z.B. entfettet. Weitere Vorbehandlungsschritte zur Beschichtung obliegen der Galvanik.

Das DKI-Merkblatt [1] geht auf zusätzliche Anwendungsgebiete ein. Enthalten sind Bänder für das Bauwesen, Kabelband, Trafoband und Bänder für die Solarthermie. Diese werden in dieser Broschüre nicht näher beschrieben, da alle Anforderungen hinsichtlich der Oberflächenqualität geringer ausfallen als die oben im Detail beschriebenen. Lediglich für Solarthermie-Bänder kann – ähnlich wie für Plattierband – ein Reinheitsgrad mittels zulässigem Restkohlenstoffgehalt vorgeschrieben werden.

3 _ Abnahmerelevante Prüfverfahren

3.1 Oberflächeninspektion

3.1.1 Grundlagen

Bei der optischen Betrachtung werden Oberflächen auf sichtbare Merkmale untersucht (Abbildung 7). Auf diese Weise können Struktur, Zusammensetzung und physikalische Eigenschaften der Oberfläche eines Materials charakterisiert werden. Die einfachste und älteste Methode hierbei ist die Sichtprüfung (siehe DIN EN 13018) ohne oder mit Hilfsmittel (z.B. Lupe, Makroskop). Zusätzlich kommen fertigungsbegleitend Kamerasysteme zum Einsatz. Weiterführende Untersuchungen sind unter Verwendung von Gerätschaften wie beispielsweise Licht- und Elektronenmikroskopen, Digitalmikroskopen oder Rasterkraftmikroskopen möglich. Diese können zusätzlich mit Analysevorrichtungen für physikalisch-chemische Oberflächenanalysen ausgestattet sein. Die letztgenannten Methoden sind jedoch nicht abnahmerelevant.

Mögliche Ziele der optischen Oberflächencharakterisierung sind:

- Analyse der Oberflächenstruktur (in der Regel wird die Rauheit betrachtet; siehe auch Kapitel 9), 2D oder 3D
- Erkennung von Fehlern (z.B. Schmutz, Verfärbungen, Kratzer, Dellen, nichtmetallische Einschlüsse/Reinheitsgrad)

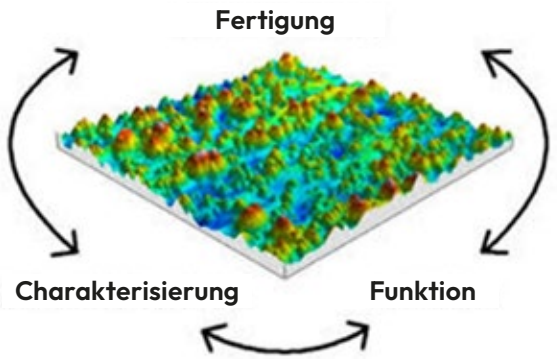


Abbildung 7: Zusammenspiel von Herstellung, Charakterisierung und Funktion von Oberflächen

Die Oberflächencharakterisierung liefert damit wichtige Informationen, aus denen sich Hinweise über das funktionale Verhalten in der Weiterverarbeitung oder der Anwendung ableiten lassen (z.B. Benetzungsverhalten, Reibwert- und Verschleißverhalten, optische Anmutung, Reflexion, Korrosion, Beschichtungsverhalten).

Zwecks zusätzlicher Hilfestellung für den Anwender werden Oberflächenzustände auch nach den angewendeten Verarbeitungs- und Bearbeitungsverfahren (Walzqualität, gebürstet, feingeschliffen, poliert etc.), den resultierenden Merkmalen (z.B. Farbskalen, Verzunderungsgrad oder Glanzgrad, matt/glänzend, passiviert etc.) oder der Verwendung (z.B. dekorativ, hochglanzpoliert, passiviert, antimikrobakteriell) benannt bzw. eingeteilt.

3.1.2 Sichtprüfung mit geschultem Personal

Die einfachste Methode der Oberflächeninspektion besteht in der Sichtprüfung mit bloßem Auge, durchgeführt durch dafür eigens geschulte Mitarbeiter. Sie ist kostengünstig, schnell anwendbar und eine grundlegende Methode zur Qualitätssicherung und Instandhaltung, die oft als erste Prüfmethode zum Einsatz kommt. Mit dieser Methode lassen sich folgende Aspekte qualitativ prüfen:

- Oberflächenfehler wie Kratzer, Dellen, Vertiefungen, Risse und Korrosion
- Farbliche Auffälligkeiten auf der Bandoberfläche
- Ebenheit und Geradheit

In der Regel wird die visuelle Prüfung entweder direkt während der Fertigung der Bänder oder durch die Entnahme entsprechender Blechplatinen nach den festzulegenden Fertigungsschritten durchgeführt.

Bei der Prüfung während der Fertigung der Bänder überwacht geschultes Prüfungspersonal per Sichtprüfung die mit definierter Bandgeschwindigkeit vorbeilaufenden Bandoberflächen über die gesamte Herstellungslänge und -breite. Dabei wird die eine Bandseite in der Regel direkt betrachtet und die Rückseite meist über Spiegelsysteme gleichzeitig kontrolliert. Wichtig ist hierbei ein definierter Nutzungsabstand zwischen Prüfer und Bandoberfläche sowie entsprechende Lichtbedingungen. In

der Regel wird hier entweder diffuses Tageslicht oder eine künstliche Beleuchtung verwendet, wobei glänzende Bandoberflächen Fehlererscheinungen generell verstärken. Auffälligkeiten, die in der Regel in standardisierten Vergleichsmusterkatalogen definiert sind, werden entweder direkt auf der Bandoberfläche markiert und klassifiziert oder deren Bandposition notiert und anschließend in einem separatem Prozessschritt bewertet. Periodisch auftretende Fehler weisen dabei auf Walzenprobleme in den Walzprozessen hin, während einmalig auftretende Fehler ganz unterschiedliche Ursachen haben können.

Bei der Prüfung von aus dem Prozess entnommenen Bandmustern wird ähnlich vorgegangen. Die Bandmuster werden bei definierten Licht- und Entfernungsbedingungen von geschultem Personal geprüft und Auffälligkeiten mit dem gültigen Fehlerkatalog verglichen. Weitere Informationen zu dem Thema Sichtprüfung finden sich in der DIN 13018 [2].

3.1.3 Automatische Oberflächeninspektionssysteme (OIS)

Heutzutage werden immer häufiger moderne Oberflächeninspektionssysteme (abgekürzt: OIS) entlang der Prozesskette eingesetzt (Abbildung 8). Diese Anlagen ersetzen das menschliche Auge durch hochauflösende Kamerasysteme und können auch bei höheren Banddurchlaufgeschwindigkeiten Oberflächenauffälligkeiten erkennen. Zudem sind diese Anlagen systemtechnisch vernetzt und liefern die Daten in Echtzeit an die vor- oder nachgelagerten Stellen in der Prozesskette, sodass die Möglichkeit besteht, Produktions- und OIS-Daten übereinanderzulegen, um einerseits Einmalereignisse zu identifizieren und anderseits auch die Produktionsabläufe anlagenübergreifend zu optimieren.

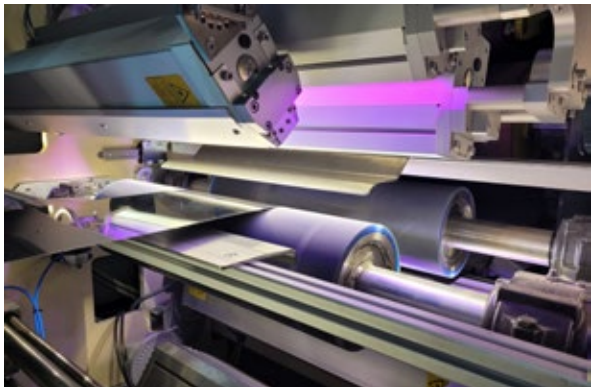


Abbildung 8: Oberflächeninspektion im Einsatz

Um die Bandoberfläche automatisch zu inspizieren, kommen in der Regel drei unterschiedliche Verfahren zum Einsatz. Diese werden anhand der Anordnung der Kameras und Belichtungsquellen unterschieden:

- Beim Auflicht strahlt sehr gerichtetes, scharf abgegrenztes Licht von oben in einem spitzen Winkel zur Normalen auf das vorbeifahrende Band. Eine Zeilenkamera schaut in den direkt reflektierten Lichtstreifen und nimmt Bilder von Grauwertunterschieden der Oberfläche auf. Im Auflicht können u. a. Flächenereignisse sehr gut erkannt werden.
- Der Lochkanal ist eine sogenannte Durchlichtinspektion, d. h. auf einer Bandseite befindet sich eine Lichtquelle und auf der anderen Bandseite eine Kamera, die in Richtung dieser Lichtquelle schaut. Sieht diese Kamera Licht, wo sich kein Licht befinden sollte, wird ein Loch bzw. ein Kantenschaden erkannt.
- Das Seitenlicht folgt dem Prinzip einer flachstehenden Sonne, die in einem sehr spitzen Winkel auf eine Hauswand scheint. So werden Unebenheiten sichtbar. Bei der Seitenlichtinspektion wird das Licht seitlich auf das vorbeilaufende Band gestrahlt, und eine senkrecht angeordnete Zeilenkamera fängt das von der Bandoberfläche reflektierte Licht ein. Durch den seitlichen Lichteinfall werden topografische Auffälligkeiten auf der Bandoberfläche erkannt.

Die Kombination verschiedener Sichten ermöglicht eine sehr gute Oberflächenqualitätsbewertung und vereinfacht die Identifikation und Einschätzung der Auffälligkeiten.

3.1.4 Einsatz von KI bei der Oberflächeninspektion

Künstliche Intelligenz (KI) hilft bei der Inspektion von Oberflächen, selbst kleinste Defekte in Echtzeit zuverlässig zu erkennen. Klassische KI arbeitet nach dem MachineLearning-Verfahren, neue Klassifikationsansätze wie z. B. DeepLearning befinden sich in der Erprobung. Oberflächenfehler sind mittels KI auch dort noch messbar, wo herkömmliche Inspektionsmethoden an ihre Grenzen stoßen. Dafür ist bei beiden vorgenannten Verfahren das Training mit einer großen Menge an Bilddaten, die insbesondere für alle Merkmalsklassen repräsentativ sein müssen, unerlässlich. Wenn diese Voraussetzung erfüllt ist, kann KI für hochpräzise Fehlererkennung in Echtzeit genutzt und damit nahtlos in den Produktionsprozess integriert werden.

3.2 Rauheitsmessung

3.2.1 Taktile Rauheitsmessung

Die Rauheit gehört zu den Merkmalen der Oberflächenunebenheit. Sie beschreibt hochfrequente, feine Spitzen und Täler der Oberfläche auf mikroskopischer Ebene, die durch die verwendeten Walzenschliffe und Bürsten entstehen (siehe auch DIN EN ISO 21920 [3]). Damit ist die Rauheit von der Welligkeit zu unterscheiden.

Herkömmlicherweise wird die Rauheit vor allen Dingen mittels Tastschnittverfahren bestimmt. Dies ist ein berührendes Messverfahren, bei dem eine Diamantspitze die Oberfläche abfährt und deren Höhen- und Tiefenunterschiede erfasst. Das Ergebnis ist ein 2D-Profil der Oberfläche, aus dem Kenngrößen wie beispielsweise der arithmetische Mittenrauwert (R_a) ermittelt werden.

Das taktile Verfahren bietet generell eine hohe Genauigkeit, bei weichen Oberflächen ist jedoch auf die Gefahr der Beschädigung zu achten. Als Alternative stehen optische Verfahren (siehe auch DIN EN ISO 25178 [4]) wie Weißlicht-Interferometrie oder Konfokaltechnik zur Verfügung.

Bei Bedarf ermöglichen optische Verfahren auch eine drei-dimensionale Charakterisierung der Oberfläche (s. DIN EN ISO 25178 [4]).

3.3 Reibung und Verschleiß: Kugelreibtest

Der Kugelreibtest (auch Kratztest genannt) dient der Beurteilung des Verschleißverhaltens von Kupfer- und Kupferlegierungsbändern, insbesondere aus CuSn- und CuNiSi-Legierungen, im Kontakt mit Werkzeugstählen. Das Verfahren wird eingesetzt, um Oxidschichten nachzuweisen, die beim Stanzprozess den Werkzeugverschleiß beschleunigen können.

Als Prüfkörper wird eine gehärtete Werkzeugstahlkugel mit definiertem Durchmesser (typisch 5 mm, Härte 60–62 HRC) verwendet, die in einer Haltevorrichtung durch einen Elektromotor in Rotation versetzt wird. Unter einer vorgegebenen Anpresskraft wird die rotierende Kugel über die Oberfläche einer Bandprobe geführt. Dabei entsteht auf der Kugeloberfläche ein charakteristisches Spiral- oder Kratzmuster, das anschließend ausgewertet wird.

Vor Beginn des Tests wird die Kugel gereinigt und unter 200-facher Vergrößerung mikroskopisch geprüft, um Kratzer oder Polierspuren auszuschließen. Jede Probe wird beidseitig geprüft, wobei für jede Seite eine neue Kugel oder zumindest eine neue Kontaktstelle zu verwenden ist. Während der Prüfung wird die Bandoberfläche mit Schmieröl benetzt, um realitätsnahe Reibbedingungen nachzustellen. Die Prüfung erfolgt bei einer konstanten Drehzahl.

Die Auswertung der Prüfkugeln erfolgt unmittelbar nach Abschluss des Tests unter einem Lichtmikroskop bei 200-facher Vergrößerung. Entscheidend ist die Art der Veränderung der Kugeloberfläche im Kontaktbereich. Liegen lediglich Kratzspuren vor, ohne dass ein Poliereffekt sichtbar wird, gilt das Ergebnis als gut oder brauchbar (Abbildung 9). Ein deutlich ausgeprägter Poliereffekt mit glänzenden, geglätteten Flächen deutet hingegen auf stark verschleißerzeugende Oxide hin. In diesem Fall wird das Ergebnis als schlecht oder sehr schlecht eingestuft (s. Abbildung 9).

Diese Prüfmethode ist angelehnt an ASTM G99 [5] und wird meist intern über Werksnormen geregelt.

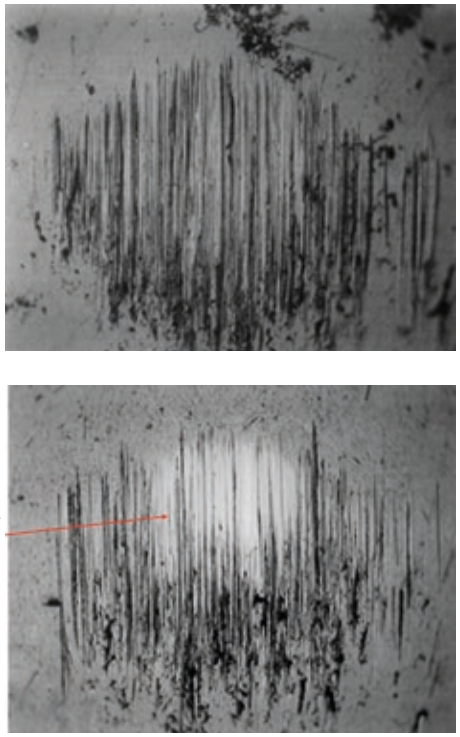


Abbildung 9: Verschleißtest an Bändern (gut vs. schlecht)

4 _ Technologische Prüfverfahren: Löttest

Der Löttest dient zur Überprüfung der Benetzbarkeit von Kupfer- und Kupferlegierungsbändern durch Lot und ist ein etabliertes Verfahren zur Bewertung der Lötbarkeit metallischer Kontaktflächen. Er gibt Auskunft über die Qualität der Oberfläche nach Herstellung, nach Alterung sowie nach möglichen Oxidationsprozessen. Durchgeführt wird die Prüfung in Anlehnung an DIN EN IEC 60068-2-20, gültig für Bauteile [6], sowie der Hubtauchprüfung aus DIN EN 13148 [7], da die frühere spezifische Norm DIN 32506 für Bänder aus Kupfer und Kupferlegierungen entfallen ist.

Als Prüfmaterial werden ausgestanzte Probenstreifen verwendet. Vor der Prüfung erfolgt eine Benetzung der Proben mit einem nicht aktivierenden Flussmittel auf Basis von Kolophonium, um die Benetzungsbedingungen zu standardisieren. Anschließend wird die Probe getrocknet und in einem Halter befestigt. Das ursprünglich eingesetzte Lötbad enthält eine SnPb-Legierung mit 37 % Blei die bei ca. 260°C. betrieben wird. Inzwischen werden je nach Kundenwusch und Normbezug auch andere Löttests durchgeführt, die sich hinsichtlich Flussmittel, Lotzusammensetzung und Prüfbedingungen unterscheiden. Vor jedem Eintauchen wird die Schlacke auf der Lotoberfläche entfernt, um eine saubere Benetzungsumgebung sicherzustellen (Abbildung 10) [7].



Abbildung 10: Gereinigte Lotoberfläche

Die Probe wird mit definierter Geschwindigkeit in das Lotbad eingetaucht, wobei die Bewegung durch einen Schrittmotor gesteuert wird. Typische Parameter sind eine Eintauchgeschwindigkeit von maximal 25 mm/s sowie eine definierte Haltezeit [6]. Während der gesamten Dauer bleibt die Probe mindestens 10 mm von den Badwänden entfernt, um Randeinflüsse zu vermeiden. Nach dem Herausziehen verbleibt die Probe so lange eingespannt, bis das Lot erstarrt ist. Eventuelle Flussmittelrückstände werden mit Ethanol entfernt.

Die Auswertung erfolgt durch visuelle Beurteilung der verzinnten Oberfläche. Als Bewertungskriterien gelten der optische Eindruck und die Homogenität der Benetzung. Abnahmekriterien sind nur unzureichend standardisiert und bedürfen immer der individuellen Absprache zwischen Kunden und Lieferanten [8]. Bei glatten und glänzenden Oberflächen gilt der Test als bestanden. Grenzmuster mit leicht welligen oder matten Bereichen weisen bereits auf beginnende Beeinträchtigungen hin. Deutlich wellige und matte Lötoberflächen werden als nicht in Ordnung bewertet, ebenso wie Flächen mit ausgeprägten Benetzungsfehlern (Abbildung 11) [13, 14].

Die Einschränkungen bestehen in der subjektiven visuellen Auswertung sowie in der Abhängigkeit von Flussmittel, Lötbadlegierung und Temperaturführung.

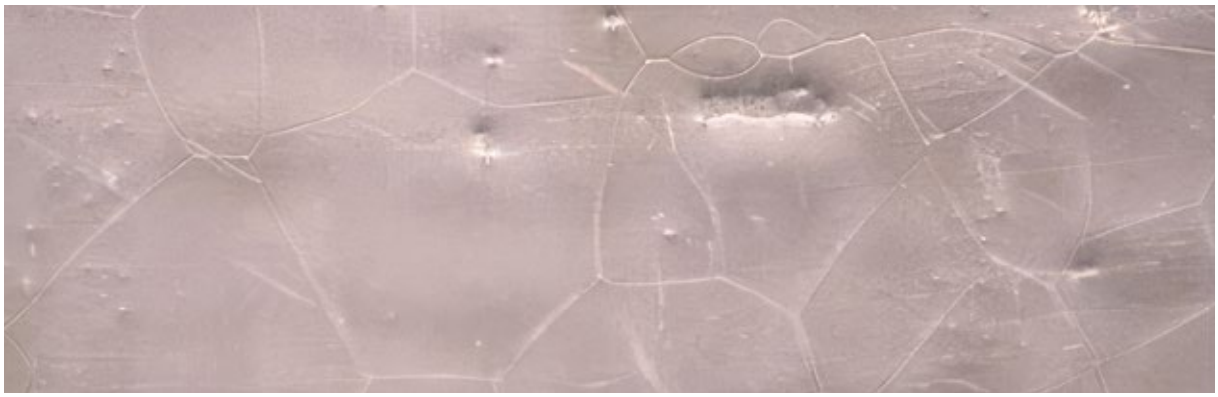


Abbildung 11: Lötoberfläche (2-4 µm Zinnschichtdicke, SnPUR) mit Benetzungsfehlern [13]

5 _ Chemische und physikalische Oberflächeneigenschaften

Die in diesem Kapitel beschriebenen Tests und Prüfverfahren werden üblicherweise zur Auslegung oder Validierung der Reinigungs- oder Passivierungsprozesse genutzt. In Einzelfällen werden sie auch bei der Bemusterung oder Qualifizierung von Produkten genutzt (z.B. Klimatest). Als serienbegleitende Abnahmeprüfung sind sie jedoch unüblich.

5.1 Tintentest

Der Tintentest ist ein praxisnahes Verfahren zur Bestimmung der Oberflächenspannung, u. a von metallischen Oberflächen (Abbildung 12). In der Produktion wird der Tintentest eingesetzt, um schnelle Aussagen bzgl. der Benetzbarkeit und der allgemeinen Sauberkeit der Oberfläche zu erhalten.

Prinzipiell wird mit mehreren Testtinten oder Stiften geprüft. Diese besitzen eine definierte Oberflächenenergie (meist von 28 bis 72 mN/m). Zur Prüfung wird eine kleine Menge der Tinte als Strich von wenigen cm oder als Tropfen auf die Bandoberfläche aufgetragen.

Es gilt folgender Zusammenhang:

- Höhere Oberflächenenergie der Bandoberfläche → Spreitung der Tinte innerhalb 2 oder 4 Sekunden, je nach Tintenspezifikation
- Niedrigere Oberflächenenergie der Bandoberfläche → Perlenbildung oder Zusammenziehen der Tinte

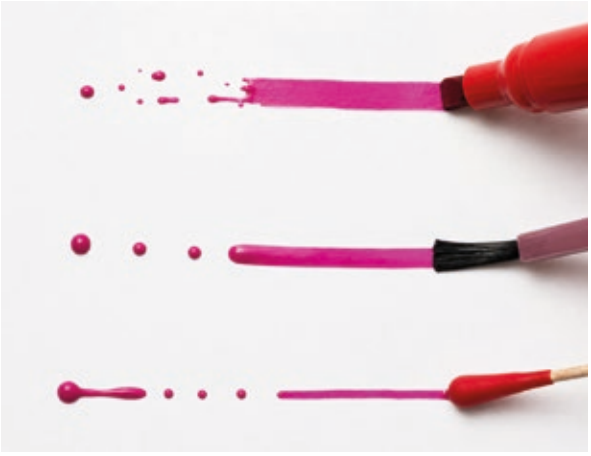


Abbildung 12: Ermittlung der Oberflächenenergie mittels Tintentest

Der Wert der Oberflächenspannung lässt sich durch systematisches Prüfen mit mehreren Teststinten unterschiedlicher Oberflächenenergien bestimmen. Dieser Wert wird erreicht, sobald der aufgetragene Strich innerhalb der Beobachtungszeit unverändert stehen bleibt. Dann entspricht der Wert der Oberflächenspannung der geprüften Oberfläche, dem der Testtinte oder ist minimal höher.

Durch subjektive visuelle Beurteilung sowie weitere Umgebungsbedingungen (wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit) ist der Tintentest nur eingeschränkt reproduzierbar. Für eine genauere Prüfung eignet sich die Kontaktwinkelmessung.

5.2 Kontaktwinkelmessung

Die Messung des Kontaktwinkels dient als direkte Methode zur Beurteilung der Benetzbarkeit, also der Wechselwirkung zwischen Kupfer- bzw. Kupferlegierungsbändern und Flüssigkeiten. Sie ist insbesondere relevant zur Bewertung von Oberflächenzuständen, wie etwa Reinigungseffektivität oder Beschädigungen.

Der Kontaktwinkel (θ) ist definiert als der Winkel zwischen der Tangente des Flüssigkeitstropfens an der Grenzlinie Flüssig–Feststoff und der Oberfläche des Festkörpers selbst (Abbildung 13). Er charakterisiert die Oberflächenenergie des Festkörpers: kleinere Winkel (< 90°) weisen auf starke Benetzung hin, größere Winkel (> 90°) auf geringe Benetzbarkeit.

Zur Bestimmung werden unterschiedliche Verfahren eingesetzt. Am häufigsten ist die Sessile-Drop-Methode, bei der ein Tropfen kontrolliert auf die Probefläche aufgebracht wird und der Winkel mittels Goniometer und Bildanalysesoftware (Tangenten- oder Young-Laplace-Methode) bestimmt wird.

Normative Grundlagen zur Kontaktwinkelmessung sind in der Normenreihe DIN EN ISO 19403 [9] beschrieben.

Diese legt das Verfahren zur Bestimmung des Kontaktwinkels und der freien Oberflächenenergie von Festkörpern fest. Das Ergebnis des Tests ist stark vom Oberflächenzustand abhängig (ölfrei, oxidiert, etc.).

Die Bewertung der Ergebnisse richtet sich nach der Anwendung: niedrige Kontaktwinkel signalisieren hohe Oberflächenenergie und sind günstig für die Weiterverarbeitung. Veränderungen im Kontaktwinkel vor und nach Reinigungsprozessen lassen Rückschlüsse auf den Oberflächenzustand zu.

5.3 Analyse des Restkohlenstoffgehalts

Der Restkohlenstoffgehalt auf der Oberfläche von Kupfer- und Kupferlegierungsbändern ist eine entscheidende Kenngröße für die Beurteilung der Oberflächenreinheit und der Weiterverarbeitbarkeit. Kohlenstoffhaltige Rückstände entstehen typischerweise durch Schmierstoffe oder organische Verbindungen, die während der Umformung und der Wärmebehandlung auf die Oberfläche gelangen. Ein zu hoher Restkohlenstoffgehalt kann die Benetzbarkeit erheblich beeinträchtigen, bei Prozessen, die keine Vorreinigung erfahren.

Zur Bestimmung des Restkohlenstoffs stehen mehrere Verfahren zur Verfügung. Ein etabliertes Verfahren ist die Verbrennungsanalyse mit Infrarotdetektion (DIN EN ISO 15350[10]), bei der die Proben unter Sauerstoffzufuhr erhitzt und die entstehenden CO_2-Mengen quantifiziert werden. Alternativ oder ergänzend können bei voraussichtlich niedrigeren Kohlenstoffgehalten oberflächennahe Verfahren wie Glühverlustbestimmung (Loss on Ignition, LOI) oder spektroskopische Methoden eingesetzt werden, etwa Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS) oder Sekundärionen-Massenspektrometrie (SIMS).

Die Probenvorbereitung erfolgt so, dass repräsentative Bandabschnitte untersucht werden. Bei der Verbrennungsanalyse werden meist kleine Probenstücke definierten Gewichts eingesetzt, während spektroskopische Verfahren eine direkte Messung auf der Oberfläche erlauben. Entscheidend ist, dass jegliche Verunreinigung durch Transport oder bei Lagerung der Proben vermieden wird.

Die Auswertung der Messergebnisse erfolgt in Bezug auf materialspezifische Grenzwerte, die aus Prozess- und Kundenspezifikationen abgeleitet werden. Für viele Anwendungen im Bereich der Elektrotechnik wird ein Restkohlenstoffgehalt von beispielsweise < 0,2 mg/m² als unkritisch angesehen.

5.4 Klimatest

Ein Klimatest kann dafür benutzt werden, den Korrosionsschutz (z.B. Passivierung mit Benzotriazol (BTA)) zu prüfen. Das Passivierungsmittel bildet auf metallischen Oberflächen eine dünne, geschlossene Schutzschicht. Mit dem Verfahren wird kontrolliert, ob die temporär wirksame Schutzschicht gleichmäßig aufgetragen wurde und der geforderte Schutz gegen Umwelteinflüsse z.B. für Transport und Lagerung gewährleistet ist.

Eine bewährte Anwendung des Klimatests ist zum Beispiel die Prüfung einseitig belasteter Bandproben. An einer Stirnseite wird mittels Lochzange eine Öffnung eingebracht, durch die die Proben während des Tests befestigt werden können. Zur gezielten Schwächung des

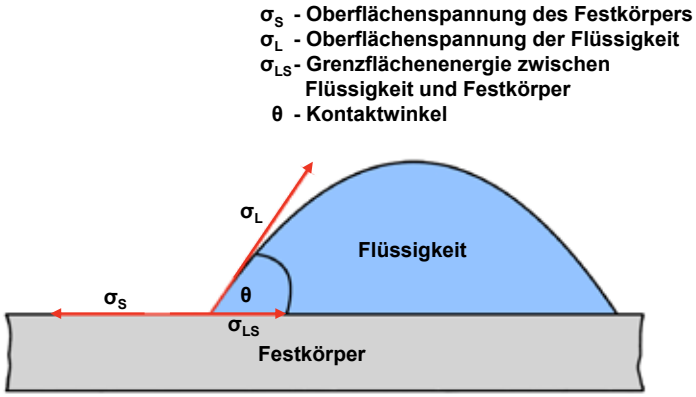


Abbildung 13: Ermittlung des Kontaktwinkels eines Flüssigkeitstropfens [7]

Passivierungsschutzes wird die gegenüberliegende Seite ca. 1 cm tief in 10 %ige Schwefelsäure eingetaucht, sodass dieser Bereich nicht mehr geschützt ist (Abbildung 14).

Die Proben werden anschließend in einer künstlich erzeugten Klimaatmosphäre getestet.

Die Prüfbedingungen simulieren eine hohe korrosive Belastung, wie sie beim Transport oder bei Einsatzbedingungen in tropischen Klimazonen auftreten kann und sind über Werksnormen geregelt [11, 12].

Nach Abschluss des Tests erfolgt die visuelle Beurteilung. Entscheidend ist die Trennlinie zwischen dem zuvor geschützten und dem in Schwefelsäure vorbehandelten, ungeschützten Teil der Probe. Eine scharfkantige, klare Trennung weist auf eine intakte Schutzwirkung hin und wird als „in Ordnung“ bewertet. Zeigen sich dagegen Verfärbungen, Anlauffarben oder Korrosionsspuren im geschützten Bereich und ist keine klare Trennlinie erkennbar, so gilt das Ergebnis als „nicht in Ordnung“.

Die Prüfmethode ist stark von subjektiven visuellen Einschätzungen abhängig.



Gutmuster (a): Scharfkantige Trennlinie, der Korrosionsschutz besteht. → Ergebnis in Ordnung.



Schlechtmuster (b): Keine Trennlinie feststellbar, Korrosionsschutz ungenügend → Ergebnis nicht in Ordnung

Abbildung 14: Passivierungstest – Ergebnisinterpretation

6 _ Literatur

[1] Deutsches Kupferinstitut: Merkblatt 100 (Lieferbedingungen für unbeschichtete Bänder aus Kupfer und Kupferlegierungen -Oberflächenbeschaffenheit-)

[2] DIN EN 13018: Zerstörungsfreie Prüfung – Sichtprüfung – Allgemeine Grundlagen

[3] DIN EN ISO 21920-1: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Profile – Teil 1: Angabe der Oberflächenbeschaffenheit

[4] DIN EN ISO 25178: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft – Teil 2: Begriffe und Kenngrößen für die Oberflächenbeschaffenheit

[5] ASTM G99-23 Standard Test Method for Wear and Friction Testing with a Pin-on-Disk or Ball-on-Disk Apparatus

[6] DIN EN IEC 60068-2-20: Umgebungseinflüsse – Teil 2-20: Prüfungen – Prüfung Ta und Tb: Prüfverfahren für die Lötbarkeit und Lötwärmebeständigkeit von Bauelementen mit herausgeführten Anschlüssen

[7] A. Bukmaier: Einfluss des Flussmittels auf das Benetzungsverhalten von flüssigem Zinn auf Kupferwerkstoffen, Sundwiger Messingwerk GmbH (nur intern verfügbar)

[8] P. Stahl, J. Guter, R. Zauter: „Alles eine Frage des Maßstabs – Diskussion des Bewertungsmaßstabs für Löttests mit bleifreiem Lot an Band aus Kupfer und Kupferlegierungen“, Tagungsband Anwenderkongress Steckverbinder 2024, S. 77-87

[9] DIN EN ISO 19403 -2: Beschichtungsstoffe – Benetzbarkeit – Teil 2: Bestimmung der freien Oberflächenenergie fester Oberflächen durch Messung des Kontaktwinkels

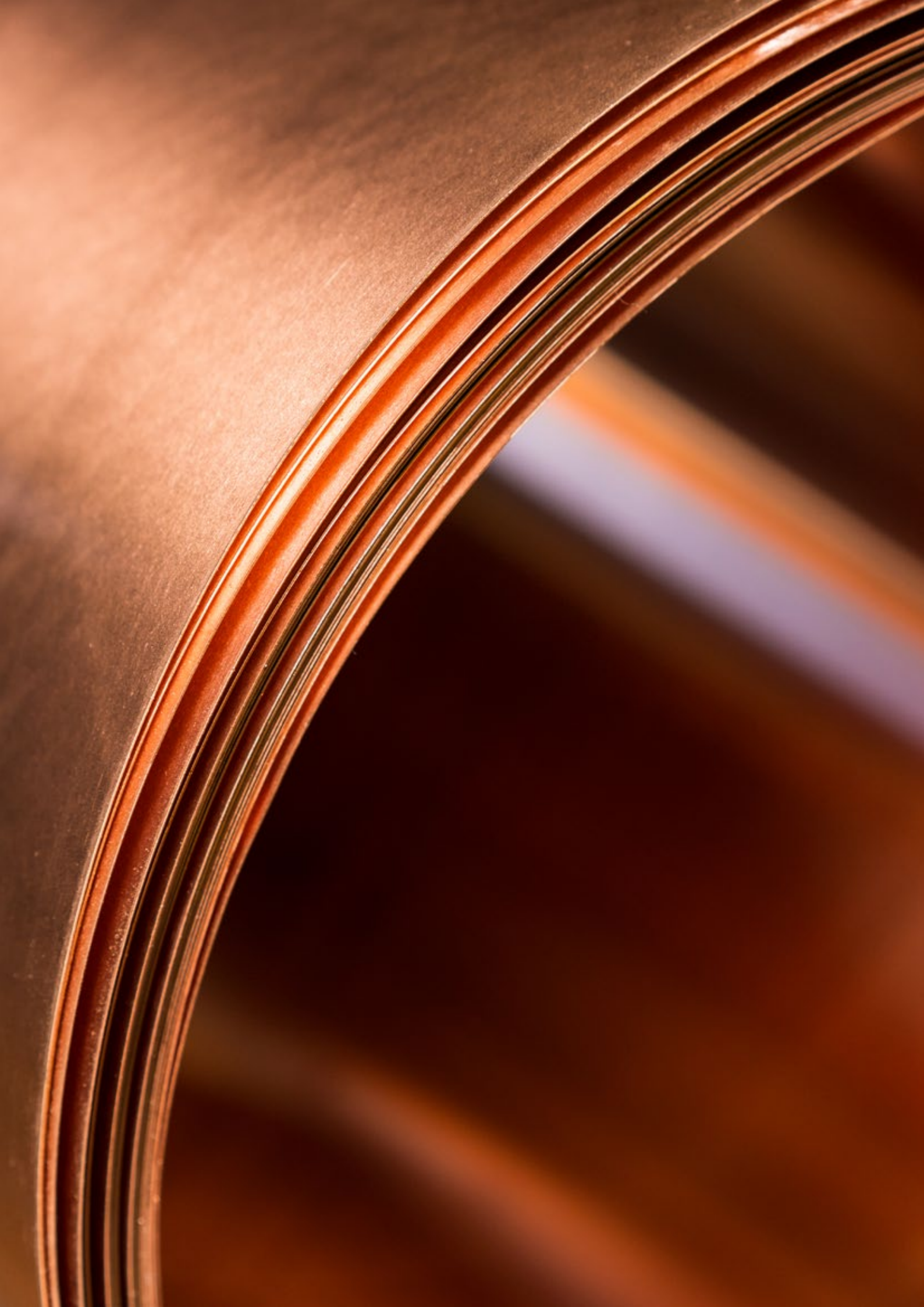
[10] DIN EN ISO 15350: Stahl und Eisen – Bestimmung der Gesamtgehalte an Kohlenstoff und Schwefel – Infrarotabsorptionsverfahren nach Verbrennung in einem Induktionsofen

[11] DIN EN IEC 60068 (Reihe): Zentrale internationale Normen für Klimaprüfungen (Wärme, Kälte, Feuchte)

[12] DIN EN ISO 6270-2: Spezifische Norm für die Beständigkeit gegen Feuchtigkeit (Kondenswasser)

[13] Wieland AG: Verzinnungseffekte- und -fehlerkatalog

[14] DIN EN 13148: Kupfer und Kupferlegierungen – Feuerverzinnte Bänder



kupfer_