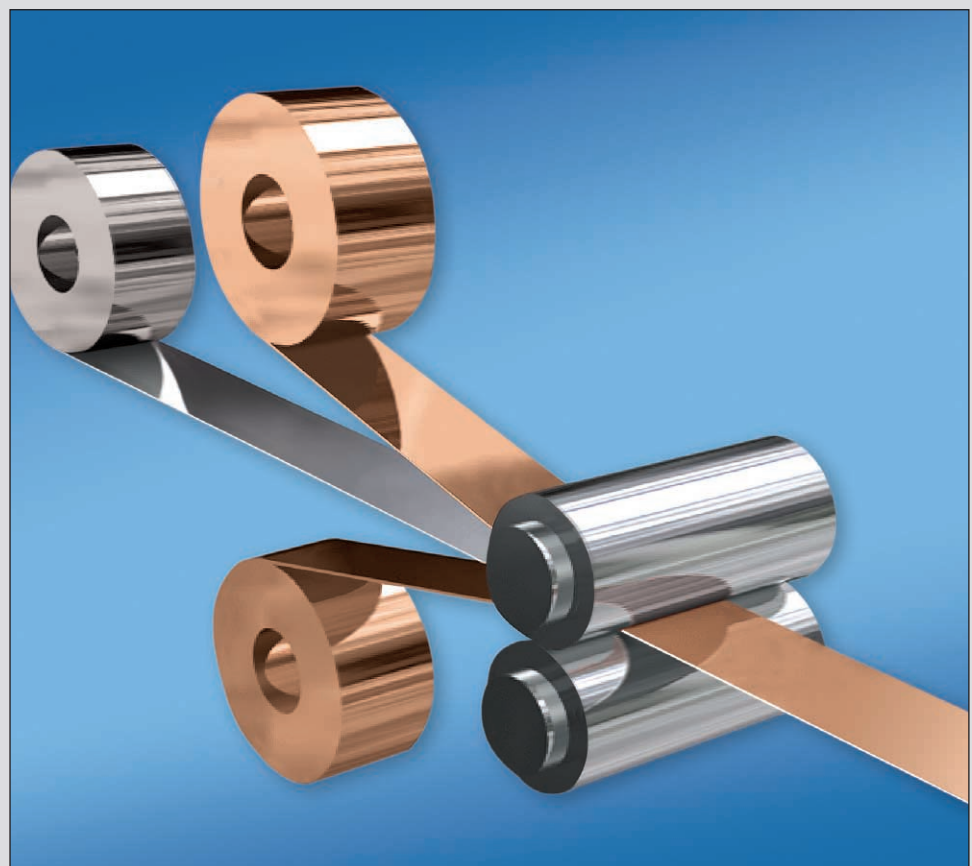




Merkblatt 383

Plattiertes Stahlblech



Stahl-Informations-Zentrum

Das Stahl-Informations-Zentrum ist eine Gemeinschaftsorganisation Stahl erzeugender und verarbeitender Unternehmen. Markt- und anwendungsorientiert werden firmenneutrale Informationen über Verarbeitung und Einsatz des Werkstoffs Stahl bereitgestellt.

Verschiedene **Schriftenreihen** bieten ein breites Spektrum praxisnaher Hinweise für Konstrukteure, Entwickler, Planer und Verarbeiter von Stahl. Sie finden auch Anwendungen in Ausbildung und Lehre.

Vortragsveranstaltungen schaffen ein Forum für Erfahrungsberichte aus der Praxis.

Messebeteiligungen und Ausstellungen dienen der Präsentation neuer Werkstoffentwicklungen sowie innovativer, zukunftsweisender Stahlanwendungen.

Als **individueller Service** werden auch Kontakte zu Instituten, Fachverbänden und Spezialisten aus Forschung und Industrie vermittelt.

Die **Pressearbeit** richtet sich an Fach-, Tages- und Wirtschaftsmedien und informiert kontinuierlich über neue Werkstoffentwicklungen und -anwendungen.

Das Stahl-Informations-Zentrum zeichnet besonders innovative Anwendungen mit dem **Stahl-Innovationspreis** aus (www.stahlinnovationspreis.de). Er ist einer der bedeutendsten Wettbewerbe seiner Art und wird alle drei Jahre ausgeteilt.

Für die Aus- und Weiterbildung von Bauingenieuren steht das **Stahlbau-Lehrprogramm** mit Fachbeiträgen und Berechnungsbeispielen auf CD-ROM zur Verfügung.

Die **Internet-Präsentation** (www.stahl-info.de) informiert u. a. über aktuelle Themen und Veranstaltungen und bietet einen Überblick über die Veröffentlichungen des Stahl-Informations-Zentrums. Schriftenbestellungen sowie Kontaktaufnahme sind online möglich.

Impressum

Merkblatt 383
„Plattiertes Stahlblech“
Ausgabe 2006
ISSN 0175-2006

Herausgeber:

Stahl-Informations-Zentrum
Postfach 10 48 42
40039 Düsseldorf

Autor:

Dr. rer. nat. Matthias Köhler
58739 Wickede

Redaktion:

Stahl-Informations-Zentrum

Die dieser Veröffentlichung zugrunde liegenden Informationen wurden mit größter Sorgfalt recherchiert und redaktionell bearbeitet. Eine Haftung ist jedoch ausgeschlossen.

Ein Nachdruck - auch auszugsweise - ist nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers und bei deutlicher Quellenangabe gestattet.

Titelbild:

Schematische Darstellung des Kaltwalzplattierens

Inhalt

	Seite
1 Einleitung	3
2 Eigenschaften und Anwendungen plattierter Bleche	4
2.1 Materialeigenschaften	4
2.1.1 Einfluss der Lagendicken	4
2.1.2 Thermische Beständigkeit ..	5
2.1.3 Chemische Beständigkeit ...	5
2.2 Anwendung	5
2.2.1 Plattierte Grobbleche	5
2.2.2 Plattierte Fein- und Feinstbleche	6
3 Herstellung plattierter Bleche	7
3.1 Bindungsmechanismen	7
3.2 Warmwalzplattieren	8
3.3 Kaltwalzplattieren	9
3.4 Sprengplattieren	11
4 Prüfung plattierter Bleche ..	12
5 Verarbeitung plattierter Bleche	12
5.1 Umformen	12
5.2 Trennen	12
5.3 Fügen	13
6 Berechnung der Kenndaten plattierter Bleche	13
6.1 Physikalische Eigenschaften	16
6.2 Mechanische Eigenschaften	16
7 Literatur und Normen	17
8 Bildnachweis	17

Mitglieder des Stahl-Informations-Zentrums:

- AG der Dillinger Hüttenwerke
- Agozal Oberflächenveredelung GmbH
- Arcelor RPS Sàrl, Luxemburg
- Benteler Stahl/Rohr GmbH
- EKO Stahl GmbH, Gruppe Arcelor
- Gebr. Meiser GmbH
- Georgsmarienhütte GmbH
- Mittal Steel Germany GmbH
- Rasselstein GmbH
- Remscheider Walz- und Hammerwerke Böllinghaus GmbH & Co. KG
- Saarstahl AG
- Salzgitter AG Stahl und Technologie
- Stahlwerke Bremen GmbH, Gruppe Arcelor
- ThyssenKrupp Electrical Steel GmbH
- ThyssenKrupp GfT Bautechnik GmbH
- ThyssenKrupp Steel AG
- ThyssenKrupp VDM GmbH
- Wickeder Westfalenstahl GmbH

1 Einleitung

Plattierte Werkstoffe sind zwei- oder mehrlagige metallische Verbundmaterialien, die in zunehmendem Maße überall dort eingesetzt werden, wo durch eine maßgeschneiderte Kombination von Werkstoffeigenschaften deutliche funktionale und/oder ökonomische Vorteile gegenüber einem homogenen Material erzielt werden können. In erster Linie findet man Materialkombinationen, bei denen die geforderten Festigkeits-eigenschaften durch den leistungs-fähigen und preisgünstigen Grundwerkstoff Stahl sichergestellt werden, während geeignete Auflagematerialien spezielle physikalische, chemische oder mechanische Eigenschaften in den Verbund einbringen.

Zur Herstellung plattierter Werkstoffe kommt heute eine Reihe unterschiedlicher Verfahren zum Einsatz, die sich in der Form und den Abmessungen der darstellbaren Halbzeuge wie Bleche, Bänder, Drähte oder Rohre (Abb. 1), im Spektrum der kombinierbaren Materialien sowie in den realisierbaren Auflagen-

verhältnissen voneinander abgrenzen. Alle Plattierverfahren basieren darauf, dass die zu verbindenden Partner in innigen Kontakt gebracht werden. Durch Einbringen von Energie werden in der Berührungzone Umstrukturierungsprozesse auf atomarer Ebene initiiert, die zur Ausbildung einer untrennbaren metallischen Bindung führen.

Der Begriff des „Plattierens“ wird leider nicht überall einheitlich verwendet. Besonders der englische Sprachgebrauch kann zu Verwechslungen führen, da hier „plating“ ursprünglich ganz allgemein für das Auftragen von Metallaufgaben steht, heute jedoch fast ausschließlich für galvanisch oder chemisch abgeschiedene Schichten gebraucht wird. Der deutsche Ausdruck „Plattieren“ wird daher am besten mit dem englischen „cladding“ übersetzt und ist allgemein nicht für galvanische Verfahren zu verwenden. Ebenso ist der Ausdruck „Elektroplattieren“ zu vermeiden [1].

Aufgrund der Gemeinsamkeiten der verschiedenen plattierten Halbzeuge wird nachfolgend besonders die mengenmäßig bedeutendste

Gruppe der plattierten Flachprodukte näher betrachtet. Die in diesem Kontext dargestellten Sachverhalte lassen sich direkt auf komplexere Halbzeug- oder Werkstückgeometrien übertragen. Bei der Beschreibung der Herstellungsmethoden wird auf die drei am weitesten verbreiteten Verfahren eingegangen, nämlich auf das Warm- und Kaltwalzplattieren sowie auf das Sprengplattieren. Dabei wurde der Schwerpunkt auf das Kaltwalzplattieren gelegt, welches die weitreichendsten Einflussmöglichkeiten auf die Eigenschaften von Halbzeug und Endprodukt bietet.

Durch die mannigfaltigen Kombinationsmöglichkeiten bei plattierten Blechen ergeben sich für den Anwender vielfältige neue Freiheitsgrade bei der Produktgestaltung. Damit einhergehend müssen im Vergleich zu homogenen Materialien meist andere Anforderungen an die Fertigungstechnik gestellt werden. Die für eine Anwendung optimalen Werkstoffeigenschaften lassen sich daher am besten durch einen intensiven Austausch zwischen Halbzeughersteller und Produktentwickler erzielen.

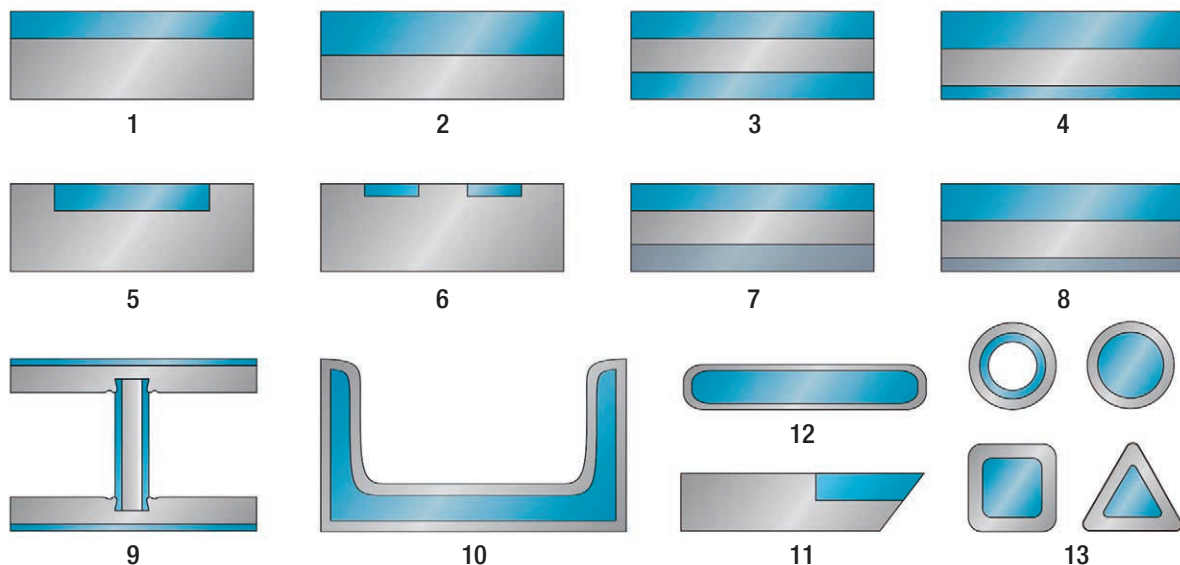


Abb. 1: Durch Plattieren darstellbare Halbzeuge

1–4 und 7–8: Plattiertes Blech
(Band oder Tafel)
5–6: Inlay-Plattierungen

9: Mechanisch gefügte DAVEX®-Profile aus
plattierten Bändern
10 und 12: Koextrudierte plattierte Profile

11: Messerverbundstahl
13: Plattierte Rohre und Drähte

2 Eigenschaften und Anwendungen plattierter Bleche

2.1 Materialeigenschaften

Als mehrlagige metallische Verbundwerkstoffe zeichnen sich plattierte Bleche dadurch aus, dass sich gewünschte Werkstoffeigenschaften durch eine geschickte Wahl der be-

teiligten Metalle und deren Lagendicken gezielt maßschneidern lassen. Die Kenngrößen der einzelnen Plattierpartner werden durch den Plattierprozess nicht verändert; die globalen Eigenschaften des Verbunds ergeben sich aus der jeweiligen Werkstoffkombination. **Tabelle 1** gibt einen Überblick über das Spektrum denkbarer Zielvorgaben bei der Auswahl eines Plattierverbunds, ergänzt durch Anwendungsbeispiele.

2.1.1 Einfluss der Lagendicken

Bei der Auswahl einer Werkstoffkombination für eine spezielle Anwendung wird häufig eine Abwägung zwischen sich widersprechenden geforderten Eigenschaften notwendig werden. Soll z. B. eine Plattierung aus Stahl und Kupfer eingesetzt werden, um zugleich hohe Festigkeit und gute Leitfähigkeit zu erhalten, so wird man feststellen, dass der Verbund bezüg-

Zielvorgaben	Beispiele
Mechanische Eigenschaften: z. B. Festigkeit, Fließverhalten, Elastizität, Biege- und Torsionssteifigkeit, tribologische Eigenschaften	Kupfer auf Stahl: Kombiniert die Leitfähigkeit von Kupfer mit der Festigkeit bzw. den Federeigenschaften von Stahl Anwendung: z. B. Elektrokontaktteile
Physikalische Eigenschaften: z. B. spezifisches Gewicht, thermische Ausdehnung und Krümmung, elektrische und thermische Leitfähigkeit, Magnetismus, Reflexionsvermögen	Thermobimetal, Materialaufbau z. B. FeNi36/Cu/NiMn2006: Thermische Krümmung und elektrische Leitfähigkeit können durch Wahl der Lagendicken eingestellt werden Anwendung: z. B. Hitzeschutzschalter
Chemische Eigenschaften: z. B. Korrosionsresistenz, Reaktionspartner, katalytische Eigenschaften	Nichtrostender Stahl* auf Stahl: Korrosions- oder hitzebeständiger Stahl als Schutz vor aggressiven Medien Anwendung: z. B. chemische Apparate
Metallurgische Eigenschaften: z. B. Darstellung von Legierungen durch Eindiffusion aufplattierter Materialien in den Grundwerkstoff	Aluminium auf korrosionsbeständigem Stahl: Darstellung eines vorab umformbaren Verbunds, Erzeugung hitzebeständiger, aber spröder Eisen-Aluminide an der Oberfläche durch Wärmebehandlung am Endbauteil Anwendung: z. B. Brennstoffzellen
Verarbeitungseigenschaften: z. B. Umformbarkeit, Eigenschaften beim thermischen oder mechanischen Fügen	Lotplattierungen, z. B. Kupfer auf korrosionsbeständigem Stahl: Kupfer als Lot für einen Hartlötprozess Anwendung: z. B. Ölkühler
Ästhetik: z. B. Optik und Haptik der Oberfläche	Korrosionsbeständiger Stahl auf Aluminium: Kombiniert die blanke Oberfläche des korrosionsbeständigen Stahls mit der geringen Dichte des Aluminiums Anwendung: z. B. Stoßfänger, Fassadenelemente
Ökonomische Zielsetzung: z. B. Kosten, Materialverfügbarkeit	Titan auf Stahl: Werkstoff mit korrosionsresistenter Titanoberfläche bei gegenüber dem Vollmaterial reduzierten Materialkosten Anwendung: z. B. chemische Apparate
* Nichtrostende Stähle sind nach DIN EN 10088-1, Ausgabe 2005-9, [2], korrosionsbeständige Stähle (früher als nichtrostende Stähle bezeichnet), hitzebeständige und warmfeste Stähle.	

Tabelle 1: Zielvorgaben bei der Auswahl plattierter Verbundbleche mit Beispielen

lich beider Eigenschaften zwischen den Extremwerten der kombinierten Materialien liegt. Es gilt also, eine hinsichtlich des gewünschten Eigenschaftsspektrums optimale Kombination zu finden. Dazu müssen die Charakteristika der in den Verbund eingehenden Einzelwerkstoffe sowie die Abhängigkeit der Merkmale des fertigen Halbzeugs von den Einzel-lagendicken bekannt sein. Hierbei ist noch zu beachten, dass durch den lagenweisen Aufbau naturgemäß Unterschiede richtungsabhängiger Größen, wie z. B. der Leitfähigkeit, parallel und senkrecht zur Lagen-ebene entstehen. Auf diese Zusammenhänge wird in Kapitel 6 näher eingegangen.

Zusätzlich zu den Volumeneigenschaften und Dicken der am Verbund beteiligten Lagen muss bei genauerer Betrachtung noch der Einfluss der Bindungszone auf die Eigenschaften des Plattierverbunds berücksichtigt werden. Bei einigen Materialkombinationen kann es durch Bildung von spröden Legierungsschichten zur Beeinträchtigung von Haftfestigkeit, Umformbarkeit, elektrischer oder thermischer Leitfähigkeit etc. kommen. Die Dicke derartiger Diffusionszonen kann jedoch meist durch Optimierung der Prozessparameter seitens des Herstellers von plattierten Blechen auf Größenordnungen von wenigen Mikrometern oder darunter begrenzt werden, so dass ein Einfluss auf die Volumeneigenschaften des Verbunds für gewöhnlich vernachlässigt werden kann.

In einigen Fällen können solche Diffusionsprozesse allerdings durchaus erwünscht sein. So eröffnet das Kaltwalzplattieren z. B. die Möglichkeit, schwer umformbare Legierungen als gut umformbares „Precursor“-Verbundmaterial darzustellen. Die Voraussetzung dafür ist, dass sich die Legierungsbestandteile so auf zwei oder mehrere Vormaterialien aufteilen lassen, dass diese eine zum Plattieren ausreichende Duktilität besitzen. Werden die Vormaterialien durch einen Plattierprozess lagenweise in einem Verbund vereint, so weist dieser gegenüber seinem schmelzme-

tallurgischen Pendant ein deutlich gesteigertes Umformpotential auf. Ist dieser Vorverbund in einen gewünschten Endzustand umgeformt worden – dies kann ein Bauteil oder auch Bandmaterial sein – so erfolgt in einer abschließenden Glühbehandlung ein diffusionsinduziertes „Nachlegieren“ des Werkstoffs. Dabei bilden die in den plattierten Lagen enthaltenen Legierungsbestandteile zusammen die gewünschte schwer umformbare Legierung mit idealerweise identischen Eigenschaften im Vergleich zur schmelzmetallurgischen Variante.

2.1.2 Thermische Beständigkeit

Das Verhalten einer Plattierung bei hohen Temperaturen wird prinzipiell von zwei Aspekten bestimmt: einerseits von den Eigenschaftsänderungen aller beteiligten Materialien und andererseits von deren Wechselwirkung untereinander. Neigt eine Materialpaarung zur Bildung von Diffusionsschichten, so ergeben sich daraus in der Regel Randbedingungen hinsichtlich der Einsatz- oder Verarbeitungstemperatur des Verbunds. Die maximal zulässigen Temperaturen werden in diesem Fall so gewählt, dass ein Anwachsen der Legierungszonen über einen geforderten Zeitraum auf eine noch akzeptable Dicke begrenzt bzw. völlig vermieden wird.

Das Heißgaskorrosionsverhalten wird primär durch die Beständigkeit der äußeren Auflagen eines Verbunds unter den jeweils vorherrschenden Umgebungsbedingungen bestimmt. Besonderes Augenmerk muss allerdings auf Schnittkanten und Füge-stellen gerichtet werden, die ggf. durch gesonderte Maßnahmen – wie in Kapitel 2.1.3 beschrieben – zu schützen sind.

2.1.3 Chemische Beständigkeit

Die chemische Beständigkeit der Oberfläche eines plattierten Werkstoffs hängt zunächst ausschließlich von den Eigenschaften der äußeren Auflagen ab. Wird unter Einsatzbe-

dingungen ein gewisser Abtrag der Auflagen erwartet, so sind zur Erreichung der Standzeit des Materials die Auflagendicken den Erfordernissen anzupassen.

Im Bereich der Schnittkanten stellt sich der Sachverhalt jedoch anders dar, da hier die inneren Lagen nicht mehr durch die Auflagen geschützt werden. Zudem müssen elektrochemische Zusammenhänge berücksichtigt werden, da es in der Regel an diesen Stellen zu Kontaktkorrosion bzw. kathodischen Schutzeffekten kommt. So kann z. B. im Fall von aluminiumplattierten weichen Stahlsorten durchaus eine von Blech- und Auflagendicke abhängige kathodische Schutzwirkung des Aluminiums auf den Stahlkern eintreten. In der Regel aber muss ein Kontakt der Schnittkanten mit korrosiven Medien durch geeignete Maßnahmen vermieden werden, etwa durch werkstoffgerechtes Konstruktionsdesign, bei dem ungeschützte Kanten konstruktiv von aggressiven Medien separiert sind, z. B. durch Umbördeln. Alternativ kommt auch ein nachträglicher Schutzschichtauftrag auf offen liegende Kanten in Betracht, etwa durch Lackieren, thermisches Spritzen etc.

2.2 Anwendung

2.2.1 Plattierte Grobbleche

Die Einsatzbereiche von warmwalz- oder sprengplattierten Grobblechen liegen überwiegend in der Herstellung chemischer Apparate, wie beispielsweise korrosionsbeständige Druckbehälter, Verdampfer, Wärmetauscher oder Elektrolyseanlagen (**Abb. 2**). Im Bereich der Erdölindustrie werden plattierte Grobbleche zum Bau von Rohrleitungen und Rohöldestillationsanlagen verwendet. Weitere wichtige Einsatzbereiche sind Kondensatoren und Rauchgasentschwefelungsanlagen von Kraftwerken, Chemikalien-tanker, lebensmitteltechnische Geräte oder Meerwasserentsalzungsanlagen. Typischerweise werden korrosionsresistente Auflegewerkstoffe wie

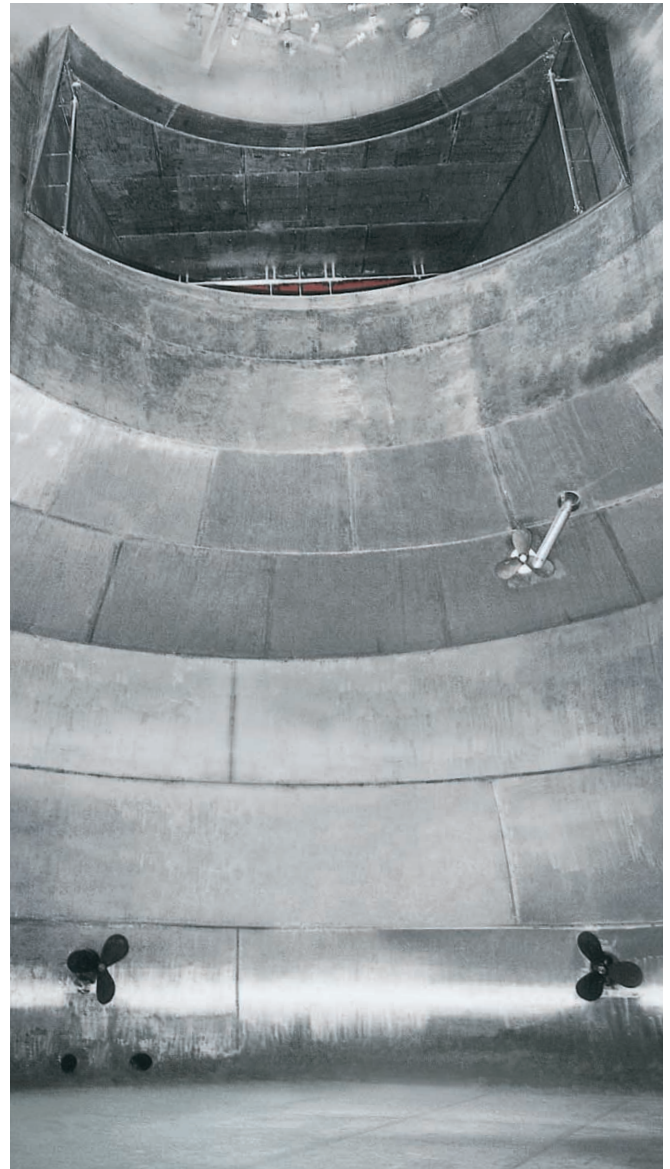


Abb. 2: Anwendungsbeispiele für plattiertes Grobblech
 Oben: Innenansicht eines Mantelschusses für einen chemischen Reaktor, sprengplattiert mit Zirkon 702 low oxygen
 Rechts: Innenansicht eines Rauchgaswäschers, warmwalzplattiert mit NiCr23Mo16Al

Chrom-Nickel-Stähle, Nickelbasislegierungen, Reinnickel oder Titan mit Bau- oder Druckbehälterstählen als Grundmaterial kombiniert. Bedingt durch die hohen Materialkosten der Auflagewerkstoffe stellt die Verwendung plattierter Bleche in diesen Bereichen eine überaus wirtschaftliche Lösung dar.

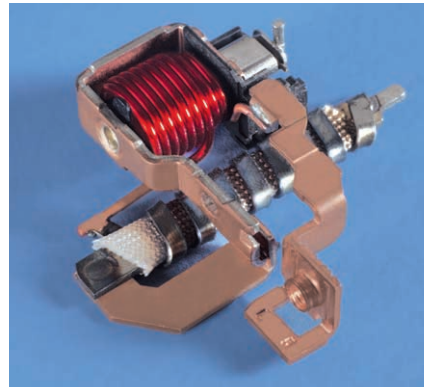
2.2.2 Plattierte Fein- und Feinstbleche

Im Bereich der Fein- und Feinstbleche findet man überwiegend kaltwalzplattiertes Material. Die Hauptabnehmer sind – in absteigender Reihenfolge – Automobilhersteller und -zulieferer, die Elektro- und Elektronikindustrie, die Bereiche Wärmetechnik und Kraftwerksbau, Hersteller von Münzen und Medaillen sowie die Haushaltsgeräteindustrie [3]. Es kommen hauptsächlich Plattierungen von Nichteisenmetallen auf weichen Stahlsorten (DC01-DC04), unlegiertem Kohlenstoffstahl (z.B. C60) oder korrosionsbeständigem Stahl zur An-

wendung. Während der stählerne Kern meist die Festigkeitseigenschaften eines Verbunds sicherstellt, erfüllen die Auflagewerkstoffe vielfältige Funktionen, z.B. als Korrosionsschutz, zur Erhöhung der elektrischen oder thermischen Leitfähigkeit, als Kontaktwerkstoff, als Katalysator, zur Verbesserung der Verschleißfestigkeit, als Lot oder zur Erzielung eines gewünschten Aussehens. **Abb. 3** zeigt einige Beispiele.



Kfz-Hitzeschutzschilde aus aluminiumplattiertem Stahlblech (DC01)
Eigenschaften: Korrosionsbeständig, hohe Reflektion von Wärmestrahlung



Elektrokontaktteil aus kupferplattiertem Stahlblech (DC04)
Eigenschaften: Hohe Festigkeit, gute Leitfähigkeit, reduzierte Kosten



Kfz-Ölkühler aus kupferplattiertem korrosionsbeständigem Stahl (X5CrNi18-10)
Eigenschaften: Kupfer fungiert als Lot



Lampenbaldachin aus messingplattiertem Stahlblech (DC04)
Eigenschaften: Hohe Festigkeit, dekoratives Aussehen

Abb. 3: Anwendungsbeispiele für kaltwalzplattierte Werkstoffe

3 Herstellung plattierter Bleche

3.1 Bindungsmechanismen

Die Mechanismen, die bei der Herstellung eines Plattierverbunds in der Bindezone wirksam sind, hängen ganz erheblich von dem verwendeten Verfahren, den Prozessparametern und den zu verbindenden Metallen ab. Zur Erzeugung einer untrennbaren metallischen Verbindung zwischen zwei Plattierpartnern müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

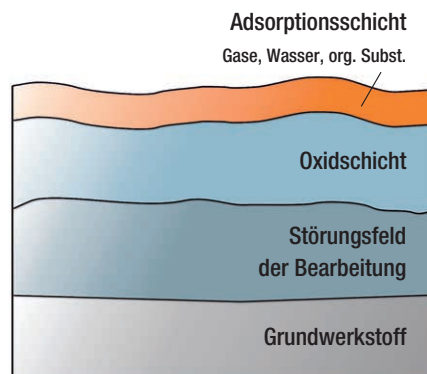


Abb. 4: Oberflächenbeschaffenheit eines metallischen Werkstoffs

- **Grenzschichten müssen entfernt oder durchbrochen werden**

Die Oberfläche eines metallischen Werkstoffs zeigt typischerweise einen lagenförmigen Aufbau (Abb. 4): Die äußerste Schicht wird gebildet aus dem Werkstoff anhaftenden (adsorbierten) Gasen wie Sauerstoff oder Wasserdampf sowie Verunreinigungen wie Ölrückständen etc. Darunter befindet sich in der Regel eine Oxidschicht. Diese Schichten bewirken eine Absättigung der Bindungsfähigkeit von Metalloberflächen [4]. Zur Ausbildung eines Verbunds müssen sie aus der Kontaktzone entfernt oder durchbrochen werden. Dies kann z.B. durch das Aufreißen spröder Oxidschichten infolge eines Umformprozesses geschehen. Eine Verfestigung oberflächennaher Bereiche des Werkstoffs (in Abb. 4 als „Störungsfeld der Bearbeitung“ gekennzeichnet) kann diesen Vorgang noch unterstützen und wird daher ggf. in Vorbehandlungsprozessen gezielt herbeigeführt.

- **Zwischen den Plattierpartnern muss ein inniger Kontakt hergestellt werden**

Die zu verbindenden Oberflächen müssen großflächig in innigen Kontakt zueinander gebracht, d. h. einander auf atomare Abstände angenähert werden. Dies kann z.B. durch hohen Druck, etwa in Verbindung mit einem Umformprozess, geschehen.

- **Umordnungsprozesse in der Bindeebene müssen initiiert werden**

Ein untrennbarer Verbund kann nur dann entstehen, wenn sich zwischen den Bindungspartnern, z.B. durch „Vermischung“ (Diffusion), eine Übergangsschicht ausbildet, über die eine kontinuierliche Anpassung der Materialeigenschaften stattfindet (Abb. 5). Sie bewirkt eine Verringerung innerer Spannungen. Ihre Bildung erfordert jedoch Energie, die z.B. über Wärme eingebracht werden kann.

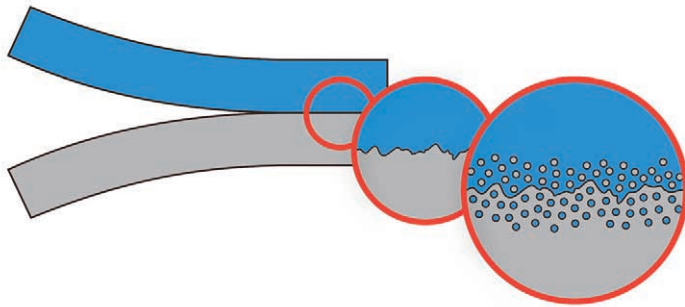


Abb. 5: Bildung eines festen Verbunds durch atomare Platzwechselforgänge (Diffusion) in der Bindezone

- **Haftungsvermindernde Prozesse müssen weitmöglichst vermieden werden**

Soll die metallische Bindung unter Einwirkung von Wärme herbeigeführt werden, so sind bei gewissen Werkstoffkombinationen exakt ermittelte Glühbedingungen einzuhalten. Somit wird sichergestellt, dass die Bildung spröder Legierungsschichten, die durch Diffusionsprozesse in der Bindezone entstehen können, vermieden oder auf ein unkritisches Maß begrenzt wird. Zudem besteht die Möglichkeit, geeignete Zwischenschichten oder Legierungsbestandteile als Diffusionsbarrieren einzusetzen.

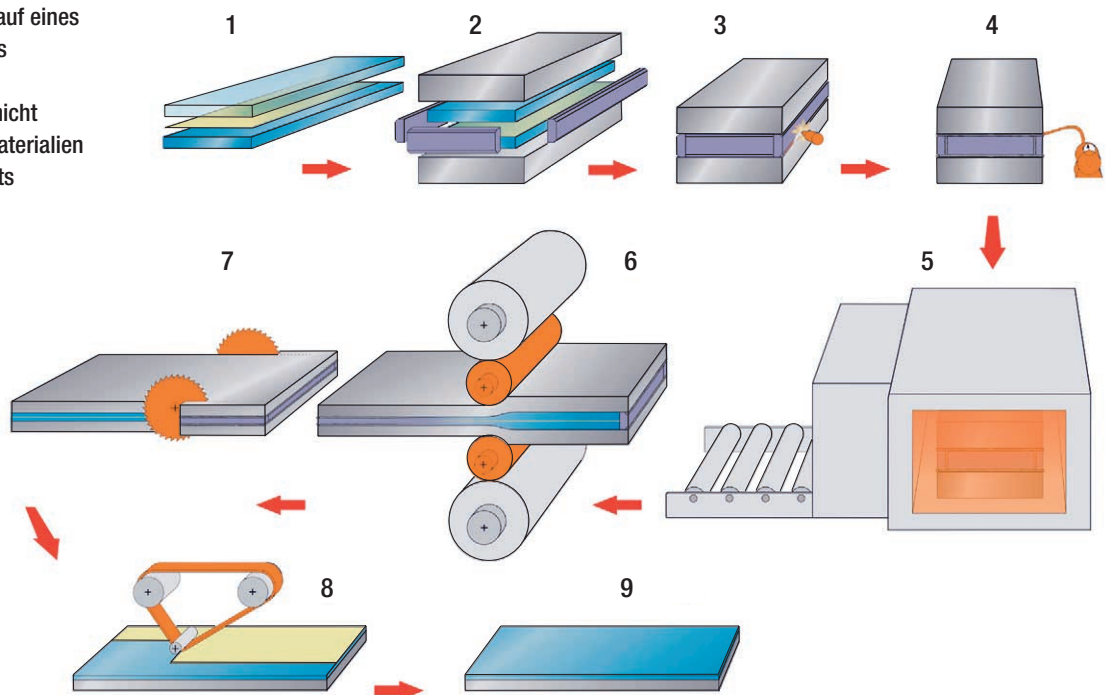
3.2 Warmwalzplattieren

Beim Warmwalzplattieren erfolgt die Verschweißung von Grund- und Auflagewerkstoff während eines Warmwalzprozesses bei Temperaturen oberhalb der Rekristallisationsschwelle (Abb. 6). Dazu werden typischerweise die zu verbindenden Materialien vor dem Walzen zu einem Paket zusammengefügt und als gesamte Einheit warm ausgewalzt. Dieser Walzvorgang läuft, wie beim Warmwalzen üblich, ohne Vor- und Rückzugskräfte am „Walzpaket“ ab, was bei Materialien mit stark differierenden Umformeingenschaften zu einem Verbiegen des Walzguts führt.

ren würde. Für zweilagige Verbunde werden daher jeweils zwei Materialpaarungen symmetrisch verbaut, wobei ein gegenseitiges Anhaften durch eine geeignete Trennschicht unterbunden wird. Die zu verbindenden Oberflächen müssen frei von Zunder und Öl sein. Das so aufgebaute Paket wird gasdicht verschweißt. Um die Bildung neuer Oxide in der Bindezone zu vermeiden, wird das Paket in der Regel evakuiert, d. h., verbleibende Luft wird durch Abpumpen entfernt. Nach dem Evakuieren werden die Pakete in geeigneten Öfen auf eine von den Werkstoffen abhängige Temperatur gebracht und gewalzt. Dabei werden durch die umformungsbedingte Längung der Materialien neue, oxidfreie Oberflächen in den Bindezonen geschaffen, was eine direkte metallische Bindung der Partner ermöglicht. Diese Bindung entsteht zeitgleich durch Diffusionsvorgänge, die durch die zur Warmumformung benötigte Temperatur aktiviert werden. Im Anschluss an das Walzen folgt eine auf die beteiligten Materialien abgestimmte Wärmebehandlung zur Einstellung gewünschter Gefügeeigenschaften. Dann wird das Paket im Randbereich der zuvor angebrachten Schweißnähte aufge-

Abb. 6: Schematischer Ablauf eines Warmwalzplattierprozesses

- 1: Einbringen der Trennschicht zwischen den Auflagematerialien
- 2: Aufbau des Plattierpakets
- 3: Verschweißen
- 4: Evakuieren
- 5: Erhitzen
- 6: Warmwalzen
- 7: Besäumen
- 8: Schleifen
- 9: Endprodukt



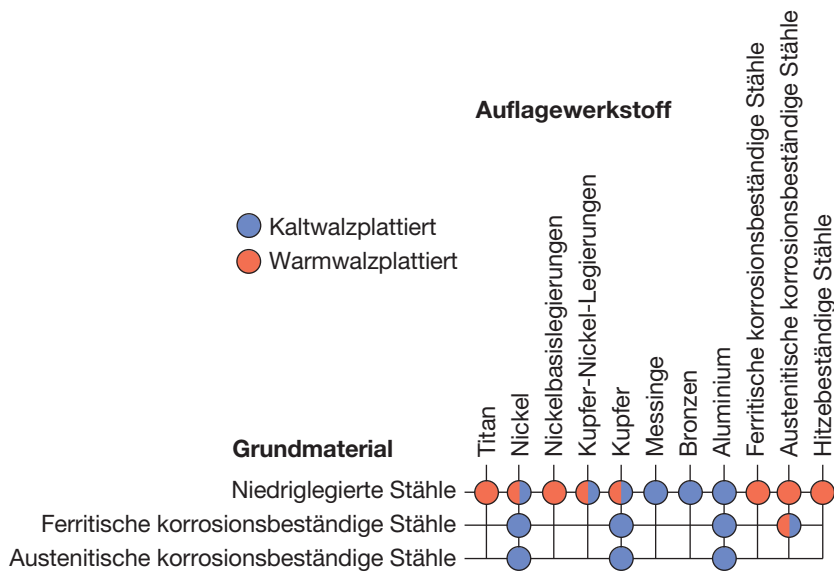


Abb. 7: Gängige Werkstoffkombinationen bei walzplattiertem Stahlblech

schnitten und geprüft, wobei häufig eine Ultraschalluntersuchung zur Sicherstellung der Haftung vorgenommen wird. Abschließend werden die Bleche noch gerichtet und ggf. durch Schleifen von Zunder und unerwünschten Oberflächenschichten befreit.

Das Warmwalzplattieren wird überwiegend zur Herstellung von Grobblechen im Abmessungsbereich von 2,5 bis 4 m Breite bei 10 bis 12 m Länge und bis über 150 mm Dicke eingesetzt. Warmwalzplattierte Verbunde lassen sich aber auch zu Feiblechen und Bändern geringerer Dicken weiterverarbeiten. Die beim Plattieren eingestellten Dickenverhältnisse der einzelnen Lagen bleiben dabei erhalten.

Die Werkstoffauswahl beschränkt sich auf Materialien mit ähnlichem Schmelzpunkt und nicht zu unterschiedlichem Warmumformverhalten. Da das Plattierpaket prozessbedingt relativ hohen Temperaturen ausgesetzt wird, können Materialien, die zur Bildung spröder Legierungsschichten neigen, nicht oder nur mit geeigneten Zwischenschichten warmwalzplattiert werden. Als Grundwerkstoffe werden meist herkömmliche Baustähle, Feinkornbaustähle, Druckbehälterstähle, Schiffbaustähle oder Stähle für den Rohrleitungsbau ein-

gesetzt. Gängige Aufgewerkstoffe sind korrosions- und hitzebeständige Stähle, aber auch Nichteisenmetalle und -legierungen, z.B. Nickelbasislegierungen, Reinnickel, Kupfer, Kupfer-Nickel-Legierungen oder Titan [5] (Abb. 7).

3.3 Kaltwalzplattieren

Das Kaltwalzplattieren unterscheidet sich vom Warmwalzplattieren dadurch, dass hier Umform- und Diffusionsprozesse getrennt voneinander ablaufen: Im ersten Schritt werden speziell gereinigte und vorbehandelte Bänder der zu plattierenden

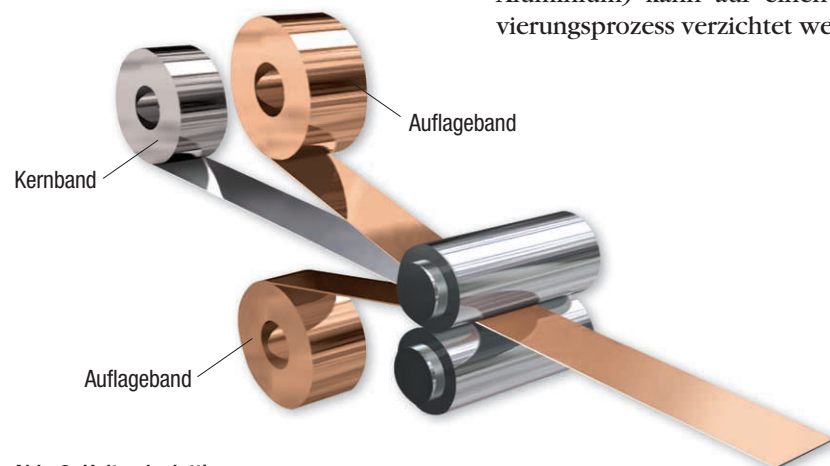


Abb. 8: Kaltwalzplattieren

Materialien gemeinsam kalt - d.h. unterhalb der Rekristallisationstemperatur - gewalzt (Abb. 8). Dabei müssen in einem Schritt sehr hohe Dickenabnahmen erzielt werden. Die so erreichte Adhäsion ist jedoch noch deutlich schwächer als die maximal erzielbare Haftfestigkeit, die erst durch eine abschließende sog. Haftungs- oder Diffusionsglühung eingestellt wird. Eine mechanische Separation der verbundenen Metalle ist danach nicht mehr möglich. Eventuelles späteres Materialversagen geht also bei entsprechender Belastung nicht von der Bindezone aus, sondern vom schwächeren Plattierpartner, dessen Scherfestigkeit somit die Haftfestigkeit limitiert. Ein so entstandener untrennbarer Verbund lässt sich wie ein homogenes Material durch Kaltwalzen weiterverarbeiten, weshalb weitreichende Einflussmöglichkeiten auf Abmessungen, Gefügestand, Festigkeiten und Oberflächenbeschaffenheiten des fertigen Halbzeugs bestehen.

Der typische Verfahrensablauf zur Herstellung eines kaltwalzplattierten Werkstoffverbunds ist in Abb. 9 dargestellt. Er gliedert sich in folgende Produktionsschritte:

- **Vorbehandlung**
 Zur Entfernung von Adsorptions- und Oxidschichten werden die zu plattierenden Bänder entfettet und zeitnah zum Plattierprozess, typischerweise durch Mattieren mit Stahldrahtbürsten, aktiviert. Bei einigen Aufgewerkstoffen (z.B. Aluminium) kann auf einen Aktivierungsprozess verzichtet werden.

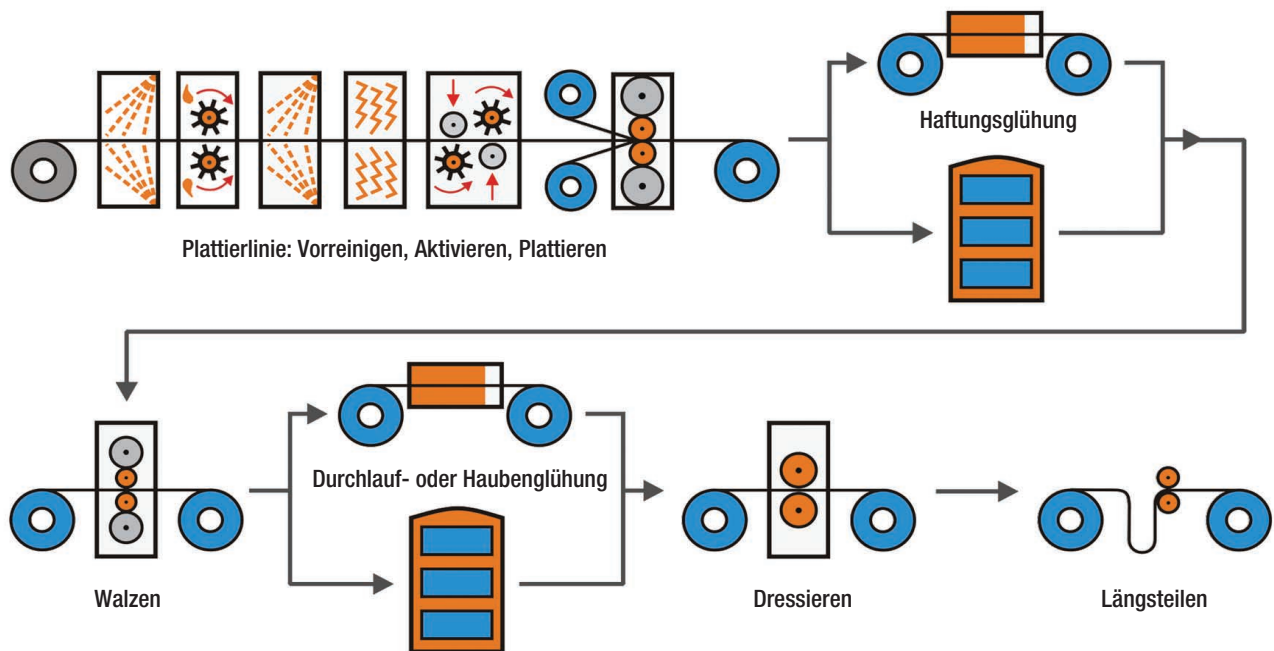


Abb. 9: Verfahrensablauf beim Kaltwalzplattieren

- **Plattieren**

Kern- und Auflagebänder werden gemeinsam kalt gewalzt, wobei je nach Materialkombination Dickenabnahmen von ca. 30% bis über 60% erzielt werden müssen. Durch die damit verbundene erhebliche Längung der Plattierpartner reißen deren spröde Grenzschichten in der Bindeebene auf und es entstehen unter Luftabschluss neue und daher hochaktive Oberflächen zwischen den zu verbindenden Metallen. Der dazu erforderliche große Druck bringt die Plattierpartner in innigen Kontakt zueinander. Dabei wird durch Adhäsionskräfte, mechanische Verklammerungen und punktuell bereits beginnende metallische Bindungen eine erste Haftung zwischen den zu verbindenden Materialien erzielt.

- **Haftungsglühen**

Durch eine Wärmebehandlung im direkten Anschluss an den eigentlichen Plattierprozess werden Umordnungsprozesse auf atomarer Ebene in den Bindeebenen aktiviert, wodurch die nach dem Plattieren noch unvollständig haftenden Lagen in einen untrennbaren Verbund umgewandelt werden

(Abb. 5). Bei einigen Materialkombinationen ist allerdings schon die beim Plattieren generierte Haftung derart hoch, dass auf eine Haftungsglühen vor dem Weiterwalzen verzichtet werden kann. Die Prozessparameter der Wärmebehandlung sind dahingehend optimiert, dass eventuell auftretende intermetallische Zwischenschichten vermieden oder minimiert werden. Als willkommener Nebeneffekt findet üblicherweise eine Rekristallisation der durch den Plattiervorgang stark kaltverfestigten Materialien statt, wodurch das für die Weiterverarbeitung des Materials notwendige Umformpotential wiederhergestellt wird. Bei Kombinationen aus hoch- und niedrigschmelzenden Materialien kann es vorkommen, dass die Schmelztemperatur eines Materials unterhalb der Rekristallisationstemperatur eines anderen Plattierpartners liegt. In diesem Fall kann der Verbund entweder nur in hartgewalzter Ausführung hergestellt werden, oder es gelingt durch gezielte Beeinflussung der Prozessparameter beim Plattieren, die dabei im höherschmelzenden Material erreichte Verfestigung auf ein für die jewei-

ligen Ansprüche hinsichtlich der Umformbarkeit akzeptables Maß zu beschränken.

Die folgenden Prozessschritte (in der unteren Hälfte der Abb. 9 dargestellt) entsprechen einer typischen Fertigung von kaltgewalztem Bandmaterial:

- **Walzen/Glühen**

Im Anschluss an die Diffusionsglühung wird der Materialverbund meist bis fast auf Enddicke gewalzt. Da aufgrund der Haftung ein unterschiedliches Fließen der Einzellagen im Verbund ausgeschlossen ist, geschieht dieser Schritt analog zum Kaltwalzen eines homogenen Materials. Die Festigkeits- und Gefügeeigenschaften des Endprodukts werden durch eine nachfolgende Wärmebehandlung entsprechend den Kundenwünschen eingestellt. Bei sehr dünnen Endabmessungen kann es erforderlich sein, aufgrund einer hohen Gesamtumformung mehrere Walz/Glüh-Zyklen durchzuführen. Andererseits besteht bei dickeren Endabmessungen auch die Möglichkeit, direkt auf Enddicke zu plattieren und auf einen anschließenden Walzprozess zu verzichten.

• **Dressieren**

Durch ein Fertigwalzen mit geringem Umformgrad kann dem Werkstoff eine im weichgeglühten Zustand eventuell auftretende Streckgrenzdehnung genommen werden. Gleichzeitig können durch verschiedene Walzenrauigkeiten gezielte Oberflächenausführungen – von matt bis blank – eingestellt werden. Spielen diese Eigenschaften beim Endprodukt keine Rolle, so kann auf den Dressierschritt verzichtet werden.

• **Längsteilen**

Im letzten Schritt wird das Material normalerweise auf Endbreite längsgesteilt und/oder an den Kanten besäumt.

Bei der anschließenden Verpackung sind etwaige Korrosionsschutzmaßnahmen auf die Eigenheiten der im Plattierverbund vorhandenen Materialien abzustimmen.

Die aufgrund der hohen Umformgrade bei der Kaltumformung erforderlichen extremen Kräfte und Drehmomente begrenzen das Abmessungsspektrum der durch Kaltwalzplattieren herstellbaren Bänder auf Breiten bis zu ca. 800 mm; typische Blechdicken liegen in Bereichen von 0,05 mm (in Sonderfällen auch darunter) bis ca. 5 mm. Die Trennung von Umformung und Diffusionsglühung erlaubt eine gezielte Einflussnahme auf den Bindungsaufbau, weshalb das Spektrum der miteinander kombinierbaren Materialien ungleich größer ist als beim Warmwalzplattieren. Als Grundwerkstoffe werden beim Kaltwalzplattieren überwiegend Stahlbleche eingesetzt. Gängige Materialkombinationen sind in Abb. 7 zusammengestellt.

lagewerkstoffs in geringem Abstand positioniert (Abb. 10). Als Abstandshalter dienen abgewinkelte dünne Metallstreifen, die später einplattiert werden. Auf den Auflegewerkstoff wird eine Schicht aus pulverförmigem Sprengstoff gleichmäßig aufgetragen. Wird dieser von einem geeigneten Punkt aus gezündet, so knickt der Auflegewerkstoff an der Detonationsfront ab, wird zum Grundwerkstoff hin beschleunigt und schlägt unter einem durch die Prozessparameter bestimmten Winkel mit hoher Geschwindigkeit auf diesen auf. Durch diesen Winkel in Verbindung mit der hohen kinetischen Aufschlagsenergie wird Material aus den Oberflächen herausgerissen und aus der Kontaktfront herausgeschleudert. Es bildet sich so ein Materialstrahl (Jet), über den restliche Oxide und Verunreinigungen aus der Bindezone entfernt werden. Die hohe kinetische Energie, mit der die Materialien aufeinander aufschlagen, bewirkt zudem in Verbindung mit dem hohen Druck die Ausbildung einer festen metallischen Bindung. Ein Aufschmelzen der Materialien findet dabei höchstens punktuell statt. Da sich der zur Ausbildung des Materialstrahls erforderliche Kollisionswinkel unterhalb des Zündpunktes noch nicht ausbilden kann, entsteht in einem gewissen Bereich um diesen herum keine Haftung. Dieser Bereich kann nicht verwendet werden und wird später entfernt. In der Kontaktzone weichen die Oberflächenschichten dem Druck aus und beginnen kurzzeitig in Richtung der Detonationsfront zu fließen. Dabei kommt es prozessbedingt zu einem wechselseitigen Aufstauen und Ineinander-

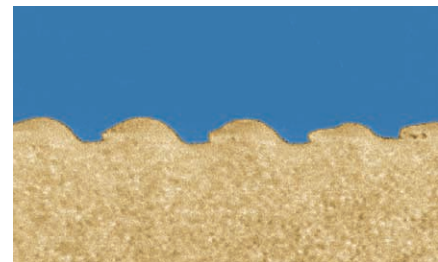


Abb. 11: Wellenförmige Bindezone einer Sprengplattierung Stahl/Titan

schieben grenznaher Schichten, wodurch eine verfahrenstypische, wellenförmige Bindezone entsteht (Abb. 11). Die Wellenfronten verlaufen daher stets senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung der Kollisionszone.

Da die Bindungserzeugung beim Sprengplattieren durch kinetische und nicht durch thermische Energie aktiviert wird, treten auch keine spröden intermetallischen Phasen auf. Daher bietet dieses Verfahren die größte Vielfalt an miteinander plattierbaren Materialkombinationen. Voraussetzung ist lediglich, dass der Auflegewerkstoff duktil genug ist, um den beim Sprengplattieren auftretenden Deformationen zu widerstehen. In der Praxis kommen jedoch aufgrund der sich überschneidenden Anwendungsbereiche meist die gleichen Materialkombinationen vor wie beim Warmwalzplattieren (Abb. 7). Die Dicke des Auflegewerkstoffs kann beim Sprengplattieren zwischen 1 mm und 15 mm liegen. Die Dicke des Grundwerkstoffs spielt praktisch keine Rolle. Die lateralen Abmessungen sprengplattierter Grobbleche sind prozessbedingt theoretisch unbegrenzt und daher nur durch Handhabbarkeit und Transportierbarkeit auf einige Meter beschränkt.

3.4 Sprengplattieren

Das Sprengplattieren nutzt den durch die Detonation eines Sprengstoffs erzeugten hohen Druck zur Darstellung von Plattierverbunden. Dazu wird nach einer entsprechenden Vorbehandlung der Plattierpartner – Entfetten, Schleifen – über dem Grundwerkstoff eine Platte des Auf-

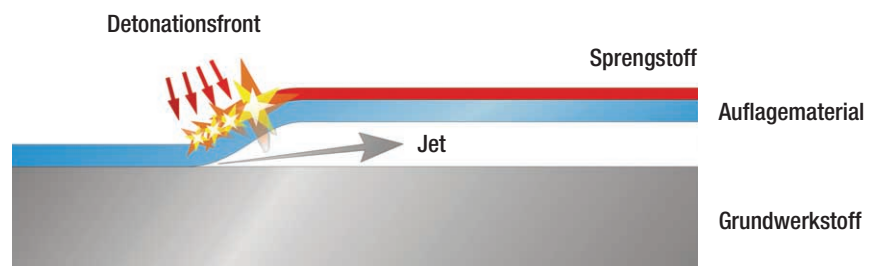


Abb. 10: Schematischer Ablauf einer Sprengplattierung

4 Prüfung plattierter Bleche

Die mechanischen Eigenschaften von plattierten Werkstoffen können durch herkömmliche Prüfverfahren ermittelt werden, wie Zugversuch, Erichsen-Prüfung, Härtemessung, Kerbschlagprüfung, Wechselbiegeversuch etc. Bei walztechnisch dargestellten Verbunden ist – in Analogie zu homogenem Material – eine eventuelle Anisotropie der Eigenschaften bezüglich der Walzrichtung zu berücksichtigen. Härtewerte der einzelnen Lagen können durch (Mikro-)Härtemessungen auf der Oberfläche oder am Schliff bestimmt werden. Ebenso sind Gefügeuntersuchungen in herkömmlicher Weise am Schliff möglich, wobei bei der Probenpräparation auf die Eigenheiten der im Verbund präsenten Werkstoffe Rücksicht genommen werden muss.

Besonderes Augenmerk gilt für gewöhnlich der Prüfung der Haftfestigkeit des Verbunds. Im Hinblick auf die oft sicherheitsrelevante Funktion der Werkstoffe werden gerade bei Grobblechen trotz des hohen Zeitaufwands genaueste Prüfungen der Haftfestigkeit am gesamten Material gefordert. Als Prüfmethode hat sich dazu die Ultraschallprüfung bewährt [6]. Dieses Verfahren ist allerdings zur Prüfung von Fein- und Feinstblechen, wie sie etwa durch das Kaltwalzplattieren hergestellt werden, aufgrund der meist zu geringen Schichtdicken nicht geeignet. Allerdings sind gerade bei geringen Auflagedicken Haftungsfehler in der Regel mit bloßem Auge erkennbar, so dass hier eine Sichtkontrolle, ergänzt durch eine Haftungsprüfung an Stichproben, normalerweise ausreichend ist. Qualitative Aussagen über die Haftfestigkeit erlauben diverse Biege- oder Verdrehprüfungen, die gewöhnlich bis zum Materialversagen durchgeführt werden. Bei guter Haftung tritt ein Versagen zuerst in einzelnen Lagen auf, aber nicht in den Bindeebenen. Eine quantitative Beurteilung der Haftfestigkeit ist mit Hilfe verschiedener Schäl- oder Abscherversuche möglich. Die Auswir-

kungen von thermisch induzierten Schubkräften auf die Bindung kann durch Abschreckversuche untersucht werden. Einen zusätzlichen Anhaltspunkt liefert die mikroskopische Beurteilung von Schliffbildern, da etwaige Diffusionsschichten oder feine Risse in der Bindeebene sofort ersichtlich werden.

5 Verarbeitung plattierter Bleche

Bei der Verarbeitung werden plattierte Bleche analog zum Vollmaterial mit den gängigen Verfahren umgeformt und gefügt. Die Verarbeitbarkeit hängt in entscheidendem Maße von den in einem Plattierverbund vorhandenen Werkstoffen, deren Eigenschaften und Wechselwirkungen ab. Generell muss daher ein plattiertes Material im Einzelfall auf die vorgesehene Weiterverarbeitung abgestimmt werden. Nicht selten gilt es, einen Kompromiss zwischen gewünschten Eigenschaften im Endprodukt und Verarbeitbarkeit des Halbzeugs zu finden. Angesichts dessen sowie der Vielfalt möglicher Materialkombinationen können an dieser Stelle nur generelle Hinweise zur Weiterverarbeitung gegeben werden.

5.1 Umformen

Aufgrund der sehr guten Haftung von plattierten Werkstoffen lassen sich diese prinzipiell wie ein homogenes Material umformen. Änderungen der relativen Lagedicken sind dabei nicht möglich, ohne den Verbund zu zerstören. Gängige und erprobte Umformverfahren für plattierte Bleche sind z.B. Walzen, Biegen sowie bei Fein- und Feinstblechen Tief- bzw. Streckziehen, Innenhochdruckumformung oder Walzprofilieren. Die Grenze der Umformbarkeit ist generell durch den Verbundpartner mit dem geringsten Umformpotential gegeben. Dabei ist bei Umformverfahren mit weitgehend druckdominier-

tem Charakter, z.B. Walzen, zu beachten, dass in einem Verbund aus Materialien mit sehr unterschiedlichen Festigkeiten weichere Werkstoffe zu einem früheren Fließen neigen, was über die Haftung starke Zugbeanspruchungen in festeren Lagen induziert. Diese inneren Spannungen können dazu führen, dass die Umformbarkeit des Verbunds unter Druck durch die Dehngrenze der festesten am Verbund beteiligten Werkstoffe limitiert wird. Andererseits ist es möglich, durch gezielte Wahl von Auf lagewerkstoffen die tribologischen Eigenschaften eines plattierten Werkstoffs so zu beeinflussen, dass eine Verbesserung des Umformverhaltens eintritt.

5.2 Trennen

Beim mechanischen Trennen, wie Schneiden oder Stanzen, sowie bei spanabhebender Bearbeitung, z.B. Bohren, Fräsen, Sägen, Drehen, müssen die verschiedenen Prozessparameter auf den jeweiligen Plattierverbund abgestimmt werden, was bei hohen Auflagedicken auf einen Kompromiss zwischen den Prozessanforderungen der beteiligten Materialien hinausläuft. Andererseits ist es durchaus möglich, Werkzeugstandzeiten durch eine intelligente Auslegung des Verbunds erheblich zu verlängern.

Sollen thermische Trennverfahren zur Anwendung kommen, muss sichergestellt werden, dass eine eventuelle Legierungsbildung im Schnittkantenbereich keine negativen Auswirkungen auf die geforderten Materialeigenschaften hat. Im Fall der Laserbearbeitung kann es erforderlich sein, bei Auf lagematerialien, die im infraroten Spektralbereich ein hohes Reflektionsvermögen aufweisen – z.B. Kupfer –, im Vorfeld entsprechend absorbierende Schichten auf das Material aufzutragen.

5.3 Fügen

Der Einsatz von plattiertem Halbzeug erfordert eine sorgfältige, auf die beteiligten Materialien abgestimmte Auswahl der anzuwendenden Fügeverfahren. Da es sich dabei prinzipbedingt um das Fügen unterschiedlicher Werkstoffe handelt, ist besonderes Augenmerk auf dabei auftretende Effekte wie Kontaktkorrosion, thermische Spannungen etc. zu richten.

Ein besonders breites Einsatzspektrum bei plattierten Fein- und Feinstblechen weisen mechanische Fügeverfahren wie (Stanz-)Nieten, Bördeln, Clinchen etc. auf. Voraussetzung ist eine ausreichende Umformbarkeit des Verbunds.

Beim Einsatz thermischer Verbindungstechniken ist grundsätzlich die Temperaturbelastbarkeit des plattierten Werkstoffs zu berücksichtigen. Eine Verminderung der Festigkeit der Verbindungsstelle, etwa durch Bildung spröder intermetallischer Phasen, muss vermieden werden.

Diese Forderungen können relativ häufig durch diverse Weich- und Hartlötverfahren erfüllt werden. Eine deutliche Steigerung der Effizienz eines Lötprozesses kann dadurch erreicht werden, dass das Lot in Form

einer aufplattierten Lage vorliegt. Hierbei kommt z.B. Kupfer zur Verbindung von korrosionsbeständigen Stählen zum Einsatz. Zudem besteht die Möglichkeit, Materialien, die nur schwer durch Hartlöten gefügt werden können, durch eine entsprechende plattierte Auflage leichter lötbar zu machen. Der plattierte Werkstoff erfüllt dabei die Funktion eines Übergangsmaterials.

Die Schweißbarkeit plattierter Verbundwerkstoffe hängt sehr stark von den jeweils beteiligten Materialien sowie den Materialdicken ab. Zweilagige Grobbleche können z.B. beidseitig so geschweißt werden, dass jeweils nur Grundmaterial mit Grundmaterial und Auflage mit Auflage verbunden wird, wobei eine Vermischung beider Werkstoffe weitgehend vermieden wird (**Abb. 12**, siehe auch [7] und [8]). Dieses Verfahren ist bei Feinblechen meist kaum mehr anwendbar. Lässt sich hier in einem konkreten Fall eine Materialversprödung durch Legierungsbildung nicht durch Optimierung der Prozessparameter beim Schweißen ausreichend minimieren, so existieren prinzipiell zwei Möglichkeiten, dies zu umgehen. Einerseits kann eventuell die Auflagedicke des Verbunds so weit reduziert werden, dass

sich die Versprödung in akzeptablen Grenzen hält. Andererseits besteht meist die Möglichkeit, störende Auflagen im Bereich der Schweißnaht vor dem Schweißen zu entfernen. Die fehlende Auflage kann ggf. anschließend wiederhergestellt werden, etwa durch thermisches Spritzen. Sollen unterschiedliche, miteinander nicht schweißbare Materialien gefügt werden, besteht wiederum die Möglichkeit, einen Plattierverbund, bestehend aus den zu verbindenden Werkstoffen, als Übergangsmaterial einzusetzen.

6 Berechnung der Kenndaten plattierter Bleche

Zwei Aspekte bestimmen die Eigenschaften eines plattierten Werkstoffverbunds grundlegend: die zu kombinierenden Materialien und deren Lagendicken. Zur Erzielung eines gewünschten Eigenschaftsspektrums müssen somit zunächst die Charakteristika der in den Verbund eingehenden Einzelwerkstoffe bekannt sein. Falls erforderlich, sind dabei weitere Einflüsse wie Temperatur, Gefügestand etc. zu berücksichtigen. Davon ausgehend können zunächst die erwarteten Gesamtmerkmale eines fertigen Halbzeugs in Abhängigkeit von den Einzellagendicken berechnet und optimiert werden. Eine anschließende Feinabstimmung des Materials sollte auf experimentell ermittelten Werkstoffeigenschaften basieren.

Der Zusammenhang zwischen den Gesamtmerkmalen eines Plattierverbunds, den Eigenschaften der darin enthaltenen Werkstoffe und deren Lagendicken soll hier, ausgehend von vereinfachenden Modellüberlegungen, näher betrachtet werden. Die sich daraus ergebenden Auslegungsgleichungen zur Abschätzung der physikalischen und mechanischen Eigenschaften plattierter Bleche sind in den **Tabellen 2 und 3** zusammengefasst. **Abb. 13** erläutert die darin verwendeten Bezeichnungskonventionen.

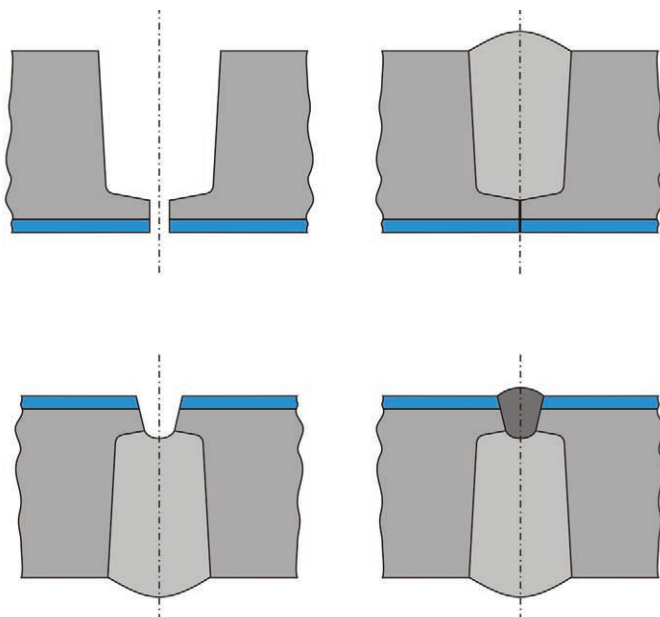


Abb. 12: Lagenweises Schweißen von plattierten Grobblechen

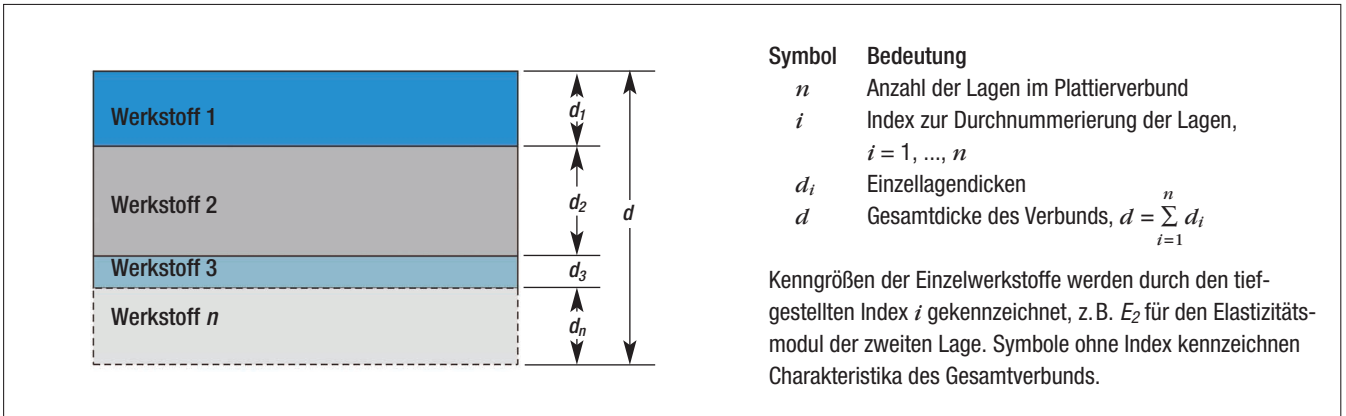


Abb. 13: Bezeichnungskonventionen für einen Plattierverbund

Verbundeigenschaft	Formel	Einheit	Symbole
Dichte	$\rho = \frac{1}{d} \sum_{i=1}^n d_i \rho_i$	g cm ⁻³	ρ_i Dichte der Lage i [g cm ⁻³]
Spezifische Wärmekapazität	$c = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i d_i c_i}{\sum_{i=1}^n \rho_i d_i}$	kJ kg ⁻¹ K ⁻¹	c_i Wärmekapazität der Lage i [kJ kg ⁻¹ K ⁻¹] ρ_i Dichte der Lage i [g cm ⁻³]
Spezifische elektrische Leitfähigkeit parallel zur Lagenebene	$\sigma_{ } = \frac{1}{d} \sum_{i=1}^n \sigma_i d_i$	m Ω ⁻¹ mm ⁻²	σ_i Spez. elektr. Leitf. der Lage i [m Ω ⁻¹ mm ⁻²]
Spezifische elektrische Leitfähigkeit senkrecht zur Lagenebene	$\sigma_{\perp} = \left(\frac{1}{d} \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\sigma_i} \right)^{-1}$	m Ω ⁻¹ mm ⁻²	σ_i Spez. elektr. Leitf. der Lage i [m Ω ⁻¹ mm ⁻²]
Spezifische Wärmeleitfähigkeit parallel zur Lagenebene	$\lambda_{ } = \frac{1}{d} \sum_{i=1}^n \lambda_i d_i$	W m ⁻¹ K ⁻¹	λ_i Spez. Wärmeleitf. der Lage i [W m ⁻¹ K ⁻¹]
Spezifische Wärmeleitfähigkeit senkrecht zur Lagenebene	$\lambda_{\perp} = \left(\frac{1}{d} \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i} \right)^{-1}$	W m ⁻¹ K ⁻¹	λ_i Spez. Wärmeleitf. der Lage i [W m ⁻¹ K ⁻¹]
Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient senkrecht zur Lagenebene	$\alpha_{\perp} = \frac{1}{d_0} \sum_{i=1}^n d_i^0 \alpha_i$	K ⁻¹	d_0 Ursprüngliche Gesamtdicke des Verbunds vor Temperaturänderung [mm] d_i^0 Ursprüngliche Dicke der Lage i vor Temperaturänderung [mm] α_i Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient der Lage i [K ⁻¹]
Resultierende Gesamtdicke des Verbunds durch thermische Ausdehnung senkrecht zur Lagenebene	$d = d_0 (1 + \alpha_{\perp} \Delta T)$	mm	d_0 Ursprüngliche Gesamtdicke des Verbunds vor Temperaturänderung [mm] α_{\perp} Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient des Verbunds senkrecht zur Lagenebene [K ⁻¹] ΔT Größe der Temperaturänderung [K]

Tabelle 2, Teil 1: Berechnung physikalischer Eigenschaften plattierter Werkstoffe

Verbundeigenschaft	Formel	Einheit	Symbole
<p>Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient parallel zur Lagenebene</p> <p>Gilt in guter Näherung unter Vernachlässigung der thermischen Krümmung für $\alpha_i \Delta T \ll 1$</p>	$\alpha_{ } = \frac{\sum_{i=1}^n E_i d_i \alpha_i}{\sum_{i=1}^n E_i d_i}$	K ⁻¹	<p>E_i E-Modul der Lage i [Pa]</p> <p>α_i Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient der Lage i [K⁻¹]</p>
<p>Resultierende Gesamtlänge des Verbunds durch thermische Ausdehnung in Lagenebene (ohne Krümmung)</p>	$l = l_0 (1 + \alpha_{ } \Delta T)$	m	<p>l_0 Ursprüngliche Länge vor Temperaturänderung [m]</p> <p>$\alpha_{ }$ Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient des Verbunds parallel zur Lagenebene [K⁻¹]</p> <p>ΔT Größe der Temperaturänderung [K]</p>
<p>Thermische Krümmung eines Bimetalls [9]</p>	$\frac{1}{r} = \frac{6(\alpha_2 - \alpha_1)(1+m)^2 \Delta T}{d \left[3(1+m)^2 + (1+mn) \left(m^2 + \frac{1}{mn} \right) \right]}$	m ⁻¹	<p>$m = \frac{d_1}{d_2}$ und $n = \frac{E_1}{E_2}$</p> <p>r Krümmungsradius [m]</p> <p>d_1 Dicke der passiven Lage [m]</p> <p>d_2 Dicke der aktiven Lage [m]</p> <p>E_1 E-Modul der passiven Lage [Pa]</p> <p>E_2 E-Modul der aktiven Lage [Pa]</p> <p>α_1 Lin. therm. Ausdehnungskoeff., passiv [K⁻¹]</p> <p>α_2 Lin. therm. Ausdehnungskoeff., aktiv [K⁻¹]</p> <p>ΔT Größe der Temperaturänderung [K]</p>
<p>Spezifische thermische Krümmung eines Bimetalls [10]</p>	$k = \frac{1}{r} \frac{d}{\Delta T}$	K ⁻¹	<p>$1/r$ Thermische Krümmung [m⁻¹]</p> <p>d Gesamtdicke [m]</p> <p>ΔT Größe der Temperaturänderung [K]</p>

Tabelle 2, Teil 2: Berechnung physikalischer Eigenschaften plattierter Werkstoffe

Verbundeigenschaft	Formel	Einheit	Symbole
<p>Elastizitätsmodul bei elastischer Deformation parallel zur Lagenebene</p>	$E_{ } = \frac{1}{d} \sum_{i=1}^n E_i d_i$	Pa	<p>E_i E-Modul der Lage i [Pa]</p>
<p>Krümmung durch ein Biegemoment</p>	$k = \frac{1}{r} = \frac{M}{B}$	m ⁻¹	<p>r Krümmungsradius [m]</p> <p>M Biegemoment [Nm]</p> <p>B Biegesteifigkeit [Nm²]</p>
<p>Biegesteifigkeit eines Blechs</p>	$B = b \sum_{i=1}^n E_i \left(y_i^2 d_i + \frac{d_i^3}{12} \right)$	Nm ²	<p>b Breite des Blechs [m]</p> <p>E_i E-Modul der Lage i [Pa]</p> <p>y_i Abstand der Mitte der Lage i von der neutralen Faser [m]</p> <p>d_i Dicke der Lage i [m]</p>
<p>Dehngrenze bei Zugbelastung in der Lagenebene</p>	$R_{p0,2} \approx \frac{1}{d} \sum_{i=1}^n d_i R_{p0,2 i}$	MPa	<p>$R_{p0,2 i}$ Dehngrenze der Lage i [MPa]</p>
<p>Zugfestigkeit parallel zur Lagenebene</p>	$R_m \approx \frac{1}{d} \sum_{i=1}^n d_i R_{m i}$	MPa	<p>$R_{m i}$ Zugfestigkeit der Lage i [MPa]</p>

Tabelle 3: Berechnung mechanischer Eigenschaften plattierter Werkstoffe

6.1 Physikalische Eigenschaften

- **Dichte**

Da sich sowohl die Massen als auch die Volumina der einzelnen Lagen addieren, ergibt sich die Dichte des Verbunds als arithmetisches Mittel der Einzeldichten, gewichtet mit den jeweiligen Schichtdicken.

- **Spezifische Wärmekapazität**

Analog errechnet sich die Gesamtwärmekapazität aus der Summe der Wärmekapazitäten der Lagen. Die spezifische Wärmekapazität des Verbunds ist damit das arithmetische Mittel der spezifischen Wärmekapazitäten der einzelnen Lagen, gewichtet mit den jeweiligen Dichten und Lagendicken.

- **Spezifische elektrische Leitfähigkeit**

Die Angabe der spezifischen Leitfähigkeiten für einen Verbund ist nur dann sinnvoll, wenn eine homogene Stromverteilung in den einzelnen Lagen vorausgesetzt wird. Kompliziertere Stromverteilungen können mit Hilfe numerischer Methoden berechnet werden (z.B. FEM). Durch die Lagenstruktur des Plattierverbunds wird die Leitfähigkeit zu einer anisotropen (also richtungsabhängigen) Größe, da in der Lagenebene eine Parallelschaltung der Einzelwiderstände vorliegt, senkrecht dazu eine Reihenschaltung.

- **Spezifische Wärmeleitfähigkeit**

Die spezifische Wärmeleitfähigkeit verhält sich analog zur spezifischen elektrischen Leitfähigkeit und ist dementsprechend wieder eine anisotrope Größe, die im stationären Fall Aussagen über den in den Lagen homogenen Wärmestrom durch den Verbund parallel zur Lagenebene und senkrecht dazu zulässt.

- **Thermische Ausdehnung und Krümmung**

Die unterschiedliche thermische Ausdehnung der Materialien in einem Plattierverbund generiert bei Temperaturänderungen thermisch induzierte innere Spannungen. Auf diese reagiert das Material als Ganzes mit Formänderungen dergestalt, dass sich ein Kräftegleichgewicht mit minimaler elastischer Energie einstellt. Die Ausdehnung des Verbunds ist durch den lagenweisen Aufbau wiederum eine anisotrope Größe. Die Ausdehnung senkrecht zu den Schichtebenen bewirkt im freien Zustand keine inneren Spannungen und errechnet sich daher einfach durch Summation der Ausdehnungen der einzelnen Schichten. Sofern eine Krümmung des Materials ausgeschlossen ist – etwa durch symmetrischen Schichtaufbau oder äußere Zwangsbedingungen –, ergibt sich ein in guter Näherung linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient des Verbunds parallel zu den Lagen. Dieser errechnet sich aus der arithmetischen Mittelung der einzelnen Ausdehnungskoeffizienten, gewichtet durch die E-Module und Dicken der jeweiligen Lagen. Im allgemeinen Fall eines asymmetrischen Verbunds kommt es zu einem Abbau innerer Spannungen durch sphärische Wölbung des Materials, so dass eine größere Längung in Lagen mit höherer thermischer Expansion entsteht. Ein schmaler Streifen krümmt sich senkrecht zu seiner Längsrichtung mit vernachlässigbarer Querverwölbung. Die thermische Ausdehnung parallel zu den Lagen weicht durch das veränderte Spannungsfeld von dem unter Vernachlässigung der Krümmung hergeleiteten Wert leicht ab. Die Krümmung kann für zweilagige Verbunde (z.B. Thermobimetalle) leicht berechnet werden (Tabelle 2). Für drei oder mehr Lagen und für komplexere Bauteilgeometrien kann das Verhalten bei Temperaturänderungen mit Hilfe von numerischen Verfahren ermittelt werden (z.B. FEM).

6.2 Mechanische Eigenschaften

- **Elastizitätsmodul**

Bei elastischer Deformation parallel zur Lagenebene addieren sich die Spannungen in den Lagen des Plattierverbunds, so dass ein effektiver Elastizitätsmodul wiederum als Mittelwert, gewichtet mit den Lagendicken, formuliert werden kann (Tabelle 3). Diese Größe kann allerdings nicht für Berechnungen von Biegung oder Torsion des Werkstoffs herangezogen werden!

- **Biegesteifigkeit**

Die Biegesteifigkeit erlaubt eine Aussage über das elastische Verhalten eines Blechs unter dem Einfluss eines Biegemoments. Für einen Plattierverbund kann die Biegesteifigkeit mit Hilfe des Satzes von Steiner berechnet werden (Tabelle 3). Die elastische Reaktion eines komplex geformten Bauteils auf Biegung oder Torsion kann mit Hilfe numerischer Simulationen (z.B. FEM) vorhergesagt werden.

- **Dehngrenze und Zugfestigkeit**

Die Dehngrenze eines Plattierverbunds bei Zugbelastung in der Lagenebene lässt sich mit Hilfe der folgenden Überlegung abschätzen: Bei Erreichen der 0,2%-Dehngrenze im Zugversuch hat gewöhnlich bei allen am Verbund beteiligten Metallen eine plastische Deformation eingesetzt, oder der Proportionalitätsbereich wurde zumindest verlassen, so dass im Vergleich zur elastischen Region die Spannungs-Dehnungs-Kurven der einzelnen Lagen relativ flach verlaufen. Unter dieser Voraussetzung werden die wirkenden Spannungen durch die $R_{p0,2}$ -Werte der Plattierpartner ungefähr richtig beschrieben. Die Gesamtspannung ist somit durch den mit den Lagendicken gewichteten Mittelwert der Dehngrenzen der einzelnen Lagen gegeben. Die Zugfestigkeit eines Plattierverbunds kann analog über das arithmetische Mittel der Zugfestigkeiten der einzelnen Lagen, gewichtet mit den

jeweiligen Schichtdicken, abgeschätzt werden.

Der Vergleich mit Zugversuchen zeigt bei vielen Werkstoffkombinationen trotz der stark vereinfachenden Annahmen meist eine relativ gute Übereinstimmung mit diesem Modell. Die tatsächlichen Verhältnisse im Verbund bei plastischer Deformation sind aber komplex (Streckgrenzdehnung, unterschiedliche Querkontraktionen, Kerbwirkungen, Scherspannungen etc.), weshalb die in Tabelle 3 angegebenen Formeln nur zur ersten Abschätzung bei der Auslegung einer Plattierung herangezogen werden sollten. Genauere Aussagen ermöglichen FEM-Simulationen und Experimente.

• Bruchdehnung

Zur Abschätzung der Bruchdehnung eines plattierten Verbunds sollte vorsichtshalber der geringste Bruchdehnungswert aller beteiligten Materialien (unter Berücksichtigung von Gefügestand und Verfestigung) herangezogen werden. Die weiteren Lagen können als zusätzliche Sicherheit betrachtet werden. Bei plattierten Werkstoffen, die aus einem dicken Kern mit dünnen Auflagen bestehen, kann die Bruchdehnung des Kernmaterials herangezogen werden, wobei die Auflagen dann einen Sicherheitsspielraum liefern. Dabei gilt es zu beachten, dass von Auflagematerialien mit geringeren Bruchdehnungswerten eine Kerbwirkung auf das Kernmaterial ausgehen kann, die zu einem Versagen vor Erreichen der Bruchspannung führt. Es gilt hier wiederum, dass tatsächliche Werte nur durch einen Zugversuch ermittelt werden können.

7 Literatur und Normen

- [1] Dettner, Heinz W.: „Lexikon für Metalloberflächen-Veredelung“, 2. erweiterte Auflage, Eugen G. Leuze Verlag, 1989
- [2] DIN EN 10088-1, Ausgabe: 2005-9 Nichtrostende Stähle - Teil 1: Verzeichnis der nichtrostenden Stähle
- [3] Kawalla, R.; Schmidtchen, M.; Spittel, M.: „Plattieren - Eine Übersicht über Herstellungstechnologien und Produkte“, In: Tagungsband MEFORM 2004, „Technologie der Werkstoffverbundherstellung durch Umformen“, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg 2004
- [4] Knauschner, A.: „Oberflächenveredeln und Plattieren von Metallen“, VEB Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1978
- [5] Wödlinger, R.; Lettner, J.: „Plattiertes Grobblech - ein kostengünstiger Hochleistungswerkstoff“, In: „Grobblech - Herstellung und Anwendung“, Stahl-Informations-Zentrum, Dokumentation 570, 1. Auflage 2001, S. 77-80
- [6] DIN 54123, Ausgabe: 1980-10 Zerstörungsfreie Prüfung; Ultraschallverfahren zur Prüfung von Schweiß-, Walz- und Sprengplattierungen
- [7] ISO/TR 17671-5, Ausgabe: 2004-05 Schweißen - Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe - Teil 5: Schweißen von plattierten Stählen

- [8] DIN EN ISO 9692-4, Ausgabe: 2003-10 Schweißen und verwandte Prozesse - Empfehlungen zur Schweißnahtvorbereitung - Teil 4: Plattierte Stähle
- [9] „Thermobimetalle - Grundlagen, Berechnung, Gestaltung, Auswahl“, G. Rau GmbH & Co., Pforzheim 1989
- [10] DIN 1715-2, Ausgabe: 1983-11 Thermobimetalle; Prüfung der spezifischen thermischen Krümmung
- [11] DIN EN ISO 12683, Ausgabe: 2005-02 Durch mechanisches Plattieren aufgebrauchte Zinküberzüge - Anforderungen und Prüfverfahren

8 Bildnachweis

Die Bilder wurden mit freundlicher Genehmigung folgender Unternehmen veröffentlicht:

Abb. 2 links:
Deggendorfer Werft und Eisenbau GmbH

Abb. 2 rechts:
ThyssenKrupp VDM GmbH

Abb. 11:
DYNAenergetics GmbH & Co. KG

Restliche Abbildungen:
Wickeder Westfalenstahl GmbH



Stahl-Zentrum

Stahl-Informations-Zentrum

Postfach 10 48 42
40039 Düsseldorf
E-Mail: siz@stahl-info.de
Internet: www.stahl-info.de