

# Lehrstuhl für Umformtechnik

Department Product Engineering  
Montanuniversität Leoben



## **DIPLOMARBEIT**

### **WALZPLATTIEREN VON MAGNESIUM-ALUMINIUM-VERBUNDEN**

Carina Maria Schlögl

Studienrichtung Werkstoffwissenschaft

Leoben, November 2012

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

## **Affidavit**

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

Leoben, 1. November 2012

Schlögl Carina Maria

## Danksagung

Die vorliegende Diplomarbeit entstand während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Umformtechnik an der Montanuniversität Leoben.

Mein besonderer Dank richtet sich an Herrn Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Bruno Buchmayr, als Leiter des Lehrstuhls für die Betrauung mit dieser Aufgabe und in der Funktion des Betreuers für die Unterstützung während der Entstehung der vorliegenden Arbeit.

Weiters richtet sich mein Dank an meinen früheren Arbeitskollegen und Projektleiter Dipl.-Ing. Harald Lehofer, der mir den Zugang zur Thematik „Walzplattieren“ erleichterte und mir stets beratend zur Seite stand.

Ebenfalls gilt mein besonderer Dank Herrn Dipl.-Ing. Dr. mont. Otto Harrer, der meine unzähligen Fragen beantwortet hat, mir immer wieder mit neuen Anregungen weitergeholfen hat und mir stets die bestmögliche Unterstützung zukommen ließ. Danke!

Auch möchte ich mich bei allen meinen Arbeitskollegen am Lehrstuhl für Umformtechnik bedanken, die mir mit Anregungen zu den einzelnen Themengebieten sehr weitergeholfen haben. Im speziellen möchte ich mich bei Herrn Clemens Planitzer, Herrn Ralph Ambrosch und Herrn Ing. Christian Stöckl für die Unterstützung während der Versuchsphase bedanken. Frau Dipl.-Ing. Barbara Böck und Herrn Dipl.-Ing. Dr. mont. Stefan Wallner danke ich für viele praktische Tipps und anregende Debatten.

Besonderen Dank gilt auch meinen Freunden Frau Dipl.-Ing. Susanne Strobl, Frau Elisabeth Arnold und Herrn Dipl.-Ing. Stefan Strobl für die motivierende Unterstützung vor der Zielgeraden.

Schließlich bedanke ich mich besonders bei allen mir nahe stehenden Menschen, insbesondere meiner Familie, ohne die ich nie so weit gekommen wäre. Danke!

## Kurzfassung

Die drei bekanntesten Leichtmetalle sind Aluminium, Titan und Magnesium. Jedes dieser Metalle hat für sich gesehen Vor- und Nachteile und wird den Anwendungsanforderungen und Marktbedingungen entsprechend ausgewählt und eingesetzt. Viele der gegenwertigen Konstruktionsansprüche stoßen dabei jedoch an die Grenzen der Eigenschaftsprofile einzelner Werkstoffe. Eine Möglichkeit diese stoffgebundenen Einschränkungen zu überwinden liegt in der Ausnutzung des Synergieeffekts von gezielt optimierten Werkstoffverbunden. Hierbei bietet sich das ökonomisch sinnvolle und technologisch umsetzbare Walzplattieren von Aluminium und Magnesium an. Das chemisch weitgehend inerte Aluminium schützt dabei das schnell oxidierende Magnesium vor Umgebungseinflüssen und damit einhergehenden Korrosionsangriffen. Das um rund 30 % leichtere Magnesium hat auf Grund seiner hexagonalen Kristallstruktur divergente Eigenschaften zu dem kubisch flächenzentrierte Aluminium. Beispielsweise kann Magnesium erst bei erhöhten Temperaturen ( $> 225\text{ °C}$ ) plastisch verformen. Dem gegenüber steht das kubisch flächenzentrierte Aluminium, dem schon bei Raumtemperatur genügend Gleitsysteme zur plastischen Verformung zur Verfügung stehen. Die vorliegende Arbeit zeigt alle Arbeitsschritte zur Herstellung eines Plattierverbundes aus der handelsüblichen Magnesiumlegierung AZ31 und der Aluminiumlegierung Al1050 auf und ermöglicht es mittels Parameterstudie die optimalen Herstellungsbedingungen für diesen Verbundwerkstoff festzulegen. Zu den analysierten Parametern zählen dabei die Vorwärmtemperatur, die Umformtemperatur, die Stichabnahme und die damit einhergehende Walzkraft, sowie die Oberflächenvorbehandlung der einzelnen Blechwerkstoffe. Ergänzt werden die optimierten Herstellungsparameter durch Betrachtungen bezüglich der eingesetzten Schmierstoffe und anderer relevanten Randbedingungen. Die Beurteilung der Plattierung erfolgt dabei anhand unterschiedlichster Charakteristika. Aufschluss über die Qualität des Verbundes geben beispielsweise die zur Trennung der beiden Plattierpartner notwendige Kraft (quantifiziert in Abschälversuchen) oder die Widerstandsfähigkeit eines Verbundes gegen Delamination (untersucht im Hin- und Herbiegeversuchen). Dabei haben vor allem der Aufbau und die Zusammensetzung der Verbundschicht (Verbindungszone) zwischen den Walzplattierpartnern enormen Einfluss auf den Plattiererfolg und die Eigenschaften des gewonnenen Verbundes. Zur Analyse dieser Grenzschicht dienen Licht-, Konvokal-, Rasterelektronenmikroskopaufnahmen und Mikrohärteverläufe. Im letzten Teilgebiet der vorliegenden Arbeit, wird der unter den optimalen Herstellungsparametern erzeugte Werkstoffverbund auf seine mechanischen bzw. thermomechanischen Kennwerte hin untersucht und dessen Umformverhalten analysiert. Mit Augenmerk auf spätere Anwendungsgebiete erfolgt die Festlegung der optimalen Umformparameter für die Halbzeugherstellung aus Magnesium-Aluminium-Verbunden.

## **Abstract**

The most common light-metals are aluminium, titanium and magnesium. Each of them has their benefits or rather drawbacks and based on these characteristics they are chosen for different engineering topics and machining solutions. But many of today's engineering tasks aren't catchable by only one metal. There is one possibility to combine two or more metals by roll cladding and use the synergy of their benefits. In this work the common magnesium alloy (AZ31) und the 1050-aluminium alloy are bonded by roll cladding. Thereby the aluminium sheet has the challenge to protect the easy-oxidant magnesium-base from environmental impact and subsequent corrosion attack.

Magnesium is about 30 % lighter then aluminium and based on its hexagonal closed packed crystal structure it is much more difficult to forming at room temperature. The face centre cubic aluminium has already at room temperature enough sliding systems for plastic deformation and forming at low temperature is not a big deal. One aim of this work is to find out the best parameters for the rolling process and optimize the fabrication of the compound. The analysed parameters are the pre-heating temperature, the temperature during the forming, the preparation of the metal surfaces and the reduction diameter of the plates, which cohere with the forming forces. The observational researches are supplemented by use of different lubrication and the assessment of other relevant system factors.

The quality of a roll clad sheet is defined by the bounding strength in the interface zone between the magnesium and the aluminium sheets. Therefore different testing methods were implemented. The composition and the building-up of the bounding-zone between the magnesium and the aluminium sheets have great impact on the final result of the roll cladding process. There are different ways to analyse these characteristics: optical microscopy, three dimensional analysis, scanning electron microscopy and micro hardness analysis.

In the final section of this work, the mechanical abilities of the compound are tested and with attention to the further usage of the material, some specific values for plate deformation are discovered. With attention to the former application areas of the compound, the optimal parameters and the largest possible window for the manufacturing of semi-finished goods are pictured.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung und Aufgabenstellung .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Grundlagen .....</b>	<b>4</b>
2.1 Walzplattieren .....	4
2.1.1 Grundlegender Aufbau des Walzplattierprozesses .....	4
2.1.2 Mechanismen im Walzspalt - Kaltverschweißen .....	5
2.1.3 Bindungszone - Verbundzone .....	7
2.1.4 Übersicht - Einflussfaktoren auf die Haftfestigkeit .....	8
2.1.5 Materialpaarung .....	10
2.1.6 Temperatur .....	10
2.1.7 Diffusionsvorgänge – Kirkendall-Effekt .....	11
2.1.8 Oberflächenvergrößerung .....	12
2.1.9 Oberflächenrauigkeit .....	12
2.1.10 Oberflächenvorbehandlung .....	13
2.1.11 Oxidschichten .....	14
2.1.12 Walzgeschwindigkeit .....	14
2.1.13 Gitterstrukturen der Plattierpartner .....	14
2.1.14 Umgebungseinflüsse .....	14
2.1.15 Greifbedingung .....	14
2.1.16 Korngröße .....	15
2.1.17 Rückfederung .....	15
2.2 Materialpaarung Aluminium-Magnesium.....	16
2.2.1 Kristallstrukturen.....	16
2.2.2 Mischkristallreihe und auftretende Phasen.....	17
2.2.3 Bindezone – Verbindungsschicht .....	18
<b>3. Experimentelle Betrachtungen .....</b>	<b>20</b>
3.1 Eingesetzte Werkstoffe .....	20
3.1.1 Magnesiumbleche .....	20
3.1.2 Aluminiumbleche .....	21
3.1.3 Wärmebehandlung der Aluminiumbleche.....	22
3.2 Probenfertigung .....	23
3.2.1 Dimensionierung .....	23
3.2.2 Oberflächenvorbehandlung .....	23
3.2.3 Herstellung der „Walzpakete“ .....	24
3.2.4 Vorwärmen der Blechpakete .....	25
3.3 Walzvorgang .....	26
3.4 Prüfverfahren während der Vorversuche .....	26

3.4.1	Die optische Analyse .....	26
3.4.2	Der Falltest .....	27
3.4.3	Der Faltest .....	27
3.4.4	Der Aufkeitest .....	27
3.4.5	Parametervariation während der Vorversuchsreihe .....	27
3.5	Optimierung des Walzplattierprozesses – Hauptversuchsreihe.....	27
3.5.1	Untersuchte Einflussparameter .....	27
3.5.2	Prüfmethoden in der Hauptversuchsreihe .....	28
3.5.3	Untersuchungen mittels Lichtmikroskop.....	28
3.5.4	Ätzbehandlung .....	28
3.5.5	Konvokalmikroskopie .....	28
3.5.6	Hin- und Herbiegeversuche.....	29
3.5.7	Schälversuche .....	30
3.5.8	Zugversuche mit ARAMIS .....	31
3.6	Umformversuche.....	32
3.6.1	Tiefungsversuche bei erhöhten Temperaturen („Näpfchentest“).....	32
3.6.2	Thermomechanische Eigenschaften – Analyse anhand des Gleeble3800-Prüfsystems.....	34
3.6.3	Härteverläufe.....	35
3.6.4	Aufnahmen mit dem Raster-Elektronen-Mikroskop.....	35
<b>4.</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion.....</b>	<b>36</b>
4.1	Ergebnisse aus der Vorversuchsreihe .....	36
4.2	Ergebnisse der Hauptversuchsreihe .....	37
4.2.1	Auswertung der Temperaturverläufe .....	38
4.2.2	Hin- und Herbiegeversuche.....	39
4.2.3	Schälversuche .....	42
4.2.4	Lichtmikroskopische Untersuchungen.....	43
4.2.5	Konvokalmikroskopie .....	44
4.3	Versuche zur Warmumformbarkeit des Materialverbundes .....	45
4.3.1	Thermomechanische Analyse mittels Gleeble-System .....	45
4.3.2	Näpfchentests .....	46
4.3.3	Lichtmikroskopische Untersuchungen.....	47
4.3.4	Rasterelektronische Untersuchungen .....	49
4.3.5	Mirkohärteverläufe.....	50
<b>5.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>51</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>53</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>54</b>

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>57</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>60</b>



# 1. Einleitung und Aufgabenstellung

Schlagwörter wie Erderwärmung, Feinstaub und Energiekrise haben das öffentliche Bewusstsein ebenso wie die anhaltend hohen Treibstoffpreise geprägt. Die Forderung nach immer leichteren aber zugleich auch sicheren Fortbewegungsmitteln beeinflusst die Automobil- sowie Flugzeugbranche heute entscheidend. Die dazu herangezogenen Leichtbaumethoden lassen sich in vier Untergruppen aufteilen: den konzeptionellen, den formgebenden, den fertigungstechnischen und den materialbezogenen Leichtbau [8,29,64]. Der materialbezogene Leichtbau bezieht sich dabei im konventionellen Sinne auf die Entwicklung oder Optimierung von Legierungssystemen. Eine weitere Möglichkeit, basieren auf der Thematik des stofflichen Leichtbaus, erschließt sich durch die Kombination verschiedener Materialien und der daraus resultierenden Eigenschaftssynergien [29]. Ausgehend von diesem Ansatz wird das ökonomisch sinnvolle und technologisch realisierbare Walzplattieren als umformtechnisches Herstellungsverfahren zum Thema dieser Arbeit gemacht. Die zur Untersuchung herangezogenen Leichtmetalle sind die gängige Magnesiumknetlegierung AZ31 und die zur Reinaluminiumserie zählende Aluminiumlegierung Al1050 [30,31].

Aluminium ist nach Stahl das am häufigsten verwendete Metall weltweit und führt mit einer Dichte von  $2,7 \text{ g/cm}^3$  den Markt der Leichtwerkstoffe an [31]. Das noch leichtere Magnesium ( $\rho_{\text{Mg}} = 1,74 \text{ g/cm}^3$ ) [30] weist zwar ein fabelhaftes Zusammenspiel von Dichte und Festigkeit auf, aber mit seiner hohen Korrosionsneigung, der schlechten Umformbarkeit bei niedrigen Temperaturen und den damit verbundenen höheren Kosten in der Fertigung wird Magnesium nur in einem vergleichsweise geringen Ausmaß eingesetzt [30]. Dass dies auf Dauer nicht so bleiben wird, zeigen das deutlich zunehmende Interesse und die Erhöhung der Forschungsbemühungen auf dem Gebiet der magnesiumbasierenden Legierungen [67-69].

Die hohe Reaktivität des Magnesiums in Kombination mit seiner Stellung in der elektrochemischen Spannungsreihe und das Fehlen einer dichten Passivierungsschicht machen besondere Korrosionsschutzmaßnahmen unumgänglich [30]. Wirksamen Schutz gegen Korrosionsangriff bieten dabei beispielsweise metallische Beschichtungssysteme, die im Gegensatz zu Lack- und Kunststoffbeschichtungen eine höhere mechanische Widerstandsfähigkeit aufweisen [46]. Eine Möglichkeit zum Schutz des korrosionsanfälligen Magnesiumgrundwerkstoffs bietet sich über die mechanische Aufbringung einer dünnen Aluminiumschicht. Das Aluminium wird dabei auf Grund seiner guten mechanischen Eigenschaften, seiner ausgezeichneten Umformbarkeit und wegen seiner großen Korrosionsbeständigkeit [2,31] als Deckschicht auf das Magnesium aufgebracht. Die dazu am häufigsten angewendeten Ver-

fahren sind das Fließ- und Strangpressen [2,39], sowie das Walz-, Laser- und Sprengplattieren [19,24,33,42].

Das in dieser Diplomarbeit behandelte Walzplattieren ermöglicht es, eine Metall-Metall-Verbundkombination herzustellen, bei der zwar der Charakter des jeweiligen Metalls erhalten bleibt, sich aber der Verwendungsbereich des Verbundes erweitert (Synergieeffekt). Durch die Einwirkung hoher Umformkräfte während des Walzvorganges und der damit einhergehenden plastischen Verformung der Werkstoffe kommt es zu einem festen Verbund beider Materialien [9]. Dieser kann anschließend wie ein homogener Werkstoff verwendet werden, der die Vorteile des Magnesiumgrundwerkstoffs und der Aluminiumschicht kombiniert und den nachteiligen Effekten in der Einzelanwendung entgegenwirkt.

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, die wichtigsten Einflussfaktoren auf den Walzplattierprozess zu benennen und zu optimieren. Dabei müssen vor allem die speziellen Eigenschaften und Anforderungen des hexagonal aufgebauten Magnesiumgitters berücksichtigt werden [30]. Eine der zu bewältigenden Herausforderung bei diesem umformtechnischen Herstellungsverfahren ist es, die aufgrund der Kristallstruktur des Magnesiums geforderte erhöhte Umformtemperatur aufbringen zu können, da am Lehrstuhl für Umformtechnik kein beheiztes Walzgerüst zur Verfügung steht. Dieser Sachverhalt führt zur Implementierung einer speziellen Stahlpaketierung, welche eine ausreichende Speicherung der Wärmeenergie während des Walzprozesses ermöglicht.

Zur Optimierung des Plattierprozesses dienen speziell konzipierte Werkstoffprüfverfahren. Dabei kommt es einerseits zur Analyse der Bindungsstärke zwischen den Plattierpartnern (beispielsweise durch Schälversuche) und andererseits zur qualitativen Bestimmung der Delaminationsneigung in der Verbundzone (beispielsweise durch Hin- und Herbiegeversuche). Bei allen angewendeten Prüfverfahren ist dabei wiederum das annähernd spröde Werkstoffverhalten der Magnesiumlegierung bei Raumtemperatur (RT) [30] zu berücksichtigen und gegebenenfalls Versuche bei erhöhten Temperaturen durchzuführen.

Besonderes Augenmerk liegt im Folgenden auf der zwischen den Blechen entstehenden Verbindungszone. Ihre Eigenschaften und ihr Aufbau prägen die Bindungsstärke und damit die finalen Eigenschaften des Plattierverbundes wesentlich [2]. Zur Analyse besagter Bindungsschicht eignen sich vor allem optische Bewertungsverfahren.

Eine weitere Zielsetzung dieser Arbeit liegt in der Ermittlung von, für die spätere Weiterverarbeitung des Werkstoffverbundes relevanten, mechanischen Kennwerten und den darauf

basierenden Prozessparametern. Auch hier muss wieder der hexagonalen Struktur des Magnesiumgrundstoffes Rechnung getragen werden, was zu einer fast ausschließlichen Analyseabfolge bei erhöhten Temperaturen führt. Die dazu eingesetzten Testverfahren unterscheiden sich in ihrer Belastungsart sowie in ihrer Verformungsgeschwindigkeit und führen zu aufschlussreichen Erkenntnissen in Bezug auf die Weiterverarbeitbarkeit des Werkstoffverbundes. Die finalen Ergebnisse zeigen das optimierte Prozessfenster für eine erfolgreiche Herstellung von Halbzeugen aus walzplattierten Magnesium(AZ31)-Aluminium(1050)-Verbunden.

## 2. Grundlagen

Der folgende Teil dieser Arbeit beinhaltet die theoretischen Grundlagen zur Thematik des Walzplattierens, sowie die aktuellen Forschungsergebnisse auf dem Gebiet der Materialpaarung von Magnesium- und Aluminiumlegierungen durch umformtechnische Herstellungsprozesse.

### 2.1 Walzplattieren

Das Verfahren des Walzplattierens kommt überall dort zum Einsatz, wo durch eine maßgeschneiderte Kombination von Werkstoffen und deren Eigenschaften deutliche funktionale und ökonomische Vorteile gegenüber dem Einsatz eines homogenen Werkstoffes erzielt werden können [9]. Im folgenden Kapitel erfolgen die Darstellung der Grundlagen dieses Plattierverfahrens, der verschiedenen Theorien zur Entstehung dieser Metall-Metall-Verbindungsart und die Darlegung einer Übersicht über die Einflussparameter während des Walzprozesses.

#### 2.1.1 Grundlegender Aufbau des Walzplattierprozesses

Der Aufbau beim Walzplattieren entspricht dem herkömmlichen Walzvorgang, mit der Ausnahme, dass anstelle eines Walzbarrens zwei oder mehrere aufeinander gelegte Bleche eingesetzt werden (siehe Abbildung 1).

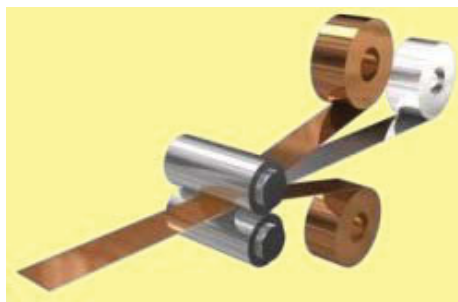


Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau des Walzplattierprozesses – auf ein Grundblech werden zwei Auflagebleche aufgewalzt – es entsteht ein sogenannter Sandwichverbund [52]

Der eigentliche Plattiervorgang erfolgt dabei im Walzspalt. Dort kommt es unter Einwirkung der Umformkräfte, zu einer sogenannten Kaltverschweißung in der Verbindungszone der zugestellten Bleche [9].

## 2.1.2 Mechanismen im Walzspalt - Kaltverschweißen

Um einen Metallverbund zwischen zwei Blechen herstellen zu können, müssen mehrere Bedingungen erfüllt sein. Generell gilt, dass die Plattierpartner ausreichend angenähert werden müssen, damit sich neue Bindungen ausbilden können [6]. Dies erfolgt über den beaufschlagten Walzdruck. Eine Annäherung der Oberflächen ist aber noch nicht ausreichend. Metallische Bindungen können nur entstehen, wenn sogenannte jungfräuliche Oberflächen zur Verfügung stehen [9]. Im Allgemeinen sind Metalle die der Atmosphäre ausgesetzt wurden, von einer Oxidschicht überzogen. Diese Schicht, die neben den eigentlichen Metalloxiden auch Verunreinigungen enthalten kann, weisen auf Grund ihrer kovalenten Bindungsanteile eine höhere Härte als der metallische Grundwerkstoff auf und hat zudem eine geringe Oberflächenspannung [1]. Sind beide Werkstoffe komplett von einer solchen Oxidschicht überzogen, kommt es theoretisch zu keiner Kaltverschweißung zwischen den Metallen, da die Oberflächen nicht chemisch aktiv sind. Durch den Walzprozess und den damit einhergehenden Zugkräften kommt es aber zu einer Längung beider Materialkomponenten. Dabei brechen die harten, spröden Oxidschichten auf und liegen als sogenannte Oxidinseln auf dem reinen, chemisch aktiven Grundmetall – der sogenannten jungfräulichen Metalloberfläche – auf. Weiters kommt es durch den Walzdruck zu einer Extrusion des Grundmaterials zwischen den Oxidinseln und zugleich zu einer bindungsfördernden intensiven Annäherung dieser reinen Metalloberflächen (siehe Abbildung 2 b-c) [2,6,9].

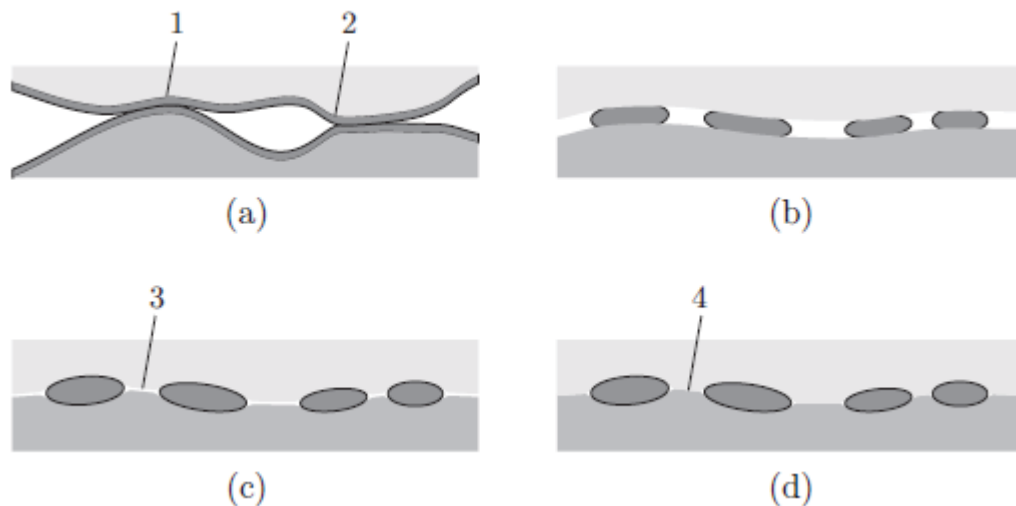


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Bindungsbildung [9]

(a) Annäherung der Rauigkeitsspitzen und (1) (2) erstes Aufreißen der Oxidschichten

(b) Oxidschicht zerfällt in einzelne Inseln

(c) Reines Grundmaterial wird zwischen den Oxidinseln extrudiert (3)

(d) im Bereich (4) kommt es zur Verschweißung des Grundmaterials

Die frisch entstandenen Oberflächen (Abbildung 2 c) weisen eine hohe Oberflächenspannung und somit eine gesteigerte Reaktivität gegenüber den ursprünglichen Oxidhäuten auf und bilden mit den gegenüberliegenden Metalloberflächen metallische Bindungen aus. Die für die metallische Bindung charakteristischen Elektronenwolken (Theorie nach Drude) unterstützen dabei den sogenannten Verschmelzungsprozess in der Bindungszone [12]. Liegt zudem eine Mischkristallreihe der Grundwerkstoffe vor, führt der Prozess zur Ausbildung des entsprechenden Mischkristalls. Ist weiters die Aktivierungsenergie (e. g. über zugeführte Wärmeenergie) ausreichend hoch, kommt es gegebenenfalls entsprechend der stöchiometrischen Zusammensetzung zur Ausbildung von intermetallischen Verbindungen [2].

Neben der Längung durch die Zugbeanspruchung beim Walzen, trägt auch die Oberflächentopographie der Walzpartner zur Ausbildung einer Verbundzone bei. Da beim Walzen auch immer eine Relativbewegung zwischen den eingesetzten Blechen entsteht, kann es zum Abscheren von Rauigkeitsspitzen an der Materialoberfläche kommen (siehe Abbildung 2 a). Dadurch erfolgt wiederum eine Initialisierung des Aufreißvorgangs der Oxidschichten und somit eine Freilegen aktiver Metalloberflächen [9].

Abbildung 3 zeigt den schematischen Ablauf der Bindungsausbildung und verdeutlicht den Einfluss der Oberflächentopographie auf den eigentlichen Bindungsvorgang. Die Grafiken unter (a) in Abbildung 3 stellen die Verformung der Unebenheiten und die Entstehung von jungfräulichen, hochaktiven Oberflächen dar. (b) zeigt den Ausgleich der unter den feinen Unebenheiten liegenden welligen Oberfläche sowie die Vergrößerung der gemeinsamen Fläche. (c) repräsentiert die Ausbildung einer gemeinsamen festen Schicht zwischen den Metallflächen über metallische Bindungsvorgänge, stellt also die Zielsetzung des eigentlichen Walzplattierens dar [9].

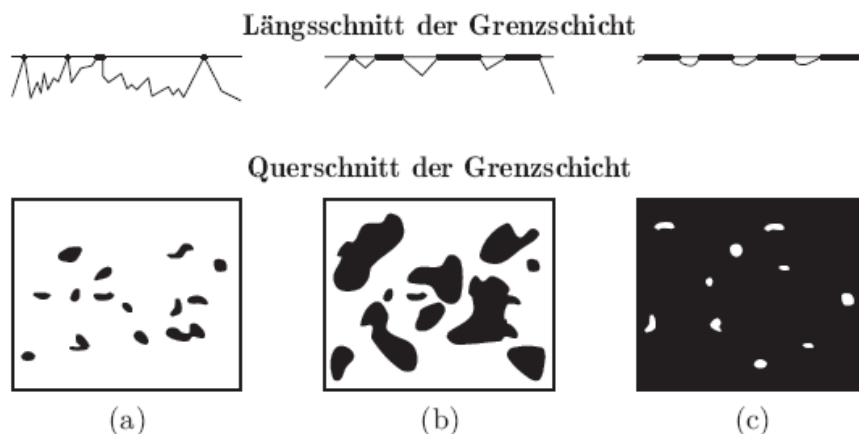


Abbildung 3: Schematische Skizze der Adhäsionsausbildung unter Druck [9]

Die oben angeführten Überlegungen werden in der Fachliteratur als Schichttheorie betitelt [6,9]. Die Schichttheorie besagt, dass eine Verbindung zwischen zwei Metallen nur dann entsteht, wenn zwei absolut reine Oberflächen miteinander in direkten Kontakt treten. In der Praxis können starke Unterschiede zwischen der Verschweißbarkeit verschiedenster Metallkombinationen auftreten – man spricht in diesem Zusammenhang von der sogenannten Verschweißneigung der Materialien. Dieser Sachverhalt kann anhand der Schichttheorie, durch die Anwesenheit unterschiedlicher Oberflächenschichten mit spezifischen physikalischen und mechanischen Eigenschaften, gut erklärt werden [6].

Eine zweite Theorie aus der Fachliteratur beschreibt die Notwendigkeit der Überschreitung einer bestimmten Energiebarriere [9]. Diese These wird als Energiebarrierentheorie angeführt [62] und stützt sich einerseits auf die Fehlpassung der Kristallgitter beider Plattierpartner und andererseits auf den Einfluss der Oberflächenenergie [2,6,9,62]. Semenov [9] führt an, dass für die Verbindungsbildung zwischen Metallen nicht nur inniger Kontakt zwischen reinen Oberflächen, sondern auch ein Anstieg der Summe aller Energien im Kristallgitter über eine gewisse Energiebarriere nötig ist. Dies beruht auf der Tatsache, dass bei polykristallinen Körpern Kristalle mit unterschiedlichsten Orientierungen an der Oberfläche vorliegen. Beim Walzplattieren ist also das Aufbringen eines gewissen Mindestumformgrades notwendig, der neben der Schaffung freier Oberflächen auch eine Verzerrung der Kristallgitter der beiden Metallpartner ermöglicht [6,9]. Weiters stehen die Adhäsionskräfte zwischen den Metallpartnern in direkter Relation zur Oberflächenenergie und der damit in Relation stehenden lokaler Atomdichte. Allgemein ausgedrückt haben Ebenen mit höherer Atomdichte und geringerer Oberflächenenergie auch niedrigere Adhäsionseigenschaften und somit eine schlechtere Bindungsfestigkeit im Walzplattierverbund [6,9,12].

Neben der Schicht- und der Energiebarrierentheorie gibt es auch noch andere Theorien, die die Verschweißvorgänge zwischen Metallen beschreiben und dabei bestimmte Charakteristika wie Kristallstruktur, Stapelfehlerenergie, Oberflächenausscheidungen usw. mit einfließen lassen [6,9].

### 2.1.3 Bindungszone - Verbundzone

Zwischen den Metallen entsteht bei erfolgreichem Walzplattieren eine sogenannte Bindungszone oder Verbundzone (Abbildung 4). Die Eigenschaften und der Aufbau dieser Bindungszone sind von entscheidender Bedeutung für die mechanischen Eigenschaften des finalen Plattierverbundes [2,68,69].

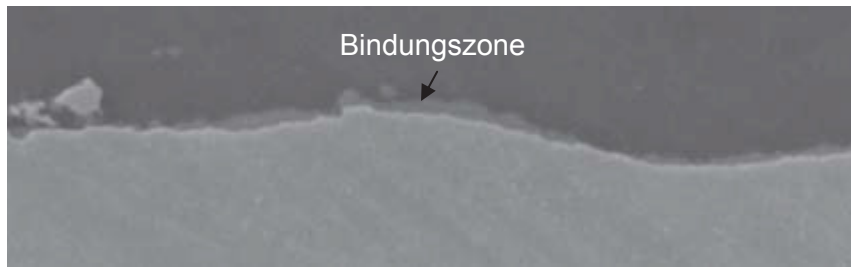


Abbildung 4: Bindungszone zwischen unterschiedlichen Metallen nach dem Walzplattierprozess [9]

In der Bindungszone kommt es während des Walzens zu atomaren Platzwechselfvorgängen [44]. Durch die Umformwärme und gegebenenfalls durch die zugeführte Wärme beim Warmwalzen können Diffusionsvorgänge initialisiert werden [68]. Viele Walzplattiervorgänge werden zusätzlich durch eine anschließende Wärmebehandlung ergänzt. Vor allem das sogenannte Kaltwalzplattieren benötigt die weitere thermische Aktivierung der Diffusion um eine ausreichende Bindungsfestigkeit zwischen den Plattierblechen erzielen zu können [9,63]. Durch die Diffusionsvorgänge entstehen dabei Mischkristalle und/oder intermetallische Verbindungen [9,65,68,69]. Die Breite der Bindungszone ist von dem Temperatureinfluss, der aufgebracht wird, der Walzkraft und den Eigenschaften der Grundwerkstoffe (z.B. Durchmesser von Zwischengitteratomplätzen) abhängig, wobei die Temperatureinwirkung dabei die größte Rolle spielt [51,69]. Generell gilt, dass eine breite Bindungszone aus einem Mischkristallgefüge optimal ist und spröde intermetallische Phasen sowie Grobkornbildung entlang der Bindungszone zu vermeiden sind [9,44,51]. Zur Charakterisierung der Bindungszone und ihrer Eigenschaften dienen optische Lichtmikroskopie, Rasterelektronenmikroskopaufnahmen, EDX-Analyse und Mikrohärteverläufe.

#### 2.1.4 Übersicht - Einflussfaktoren auf die Haftfestigkeit

Beim Walzplattieren hat eine Vielzahl von Herstellungsfaktoren und Prozessparametern Einfluss auf die Qualität des finalen Werkstoffverbundes [9]. Abbildung 5 bietet eine gute Übersicht der wesentlichen Parameter. Die darin angeführten Einflussfaktoren sind im folgenden Abschnitt dieser Arbeit ausführlich beschrieben. Ergänzend dazu liefert Abbildung 6 eine fundierte Darstellung sämtlicher in der einschlägigen Literatur angeführten Einflussfaktoren und stellt in diesem Zusammenhang die stetig steigende Komplexität der Wechselwirkungen im System dar.





Abbildung 5: Zusammenhänge zwischen den wichtigsten Herstellungs- und Systemparametern beim Walzplattieren [50]

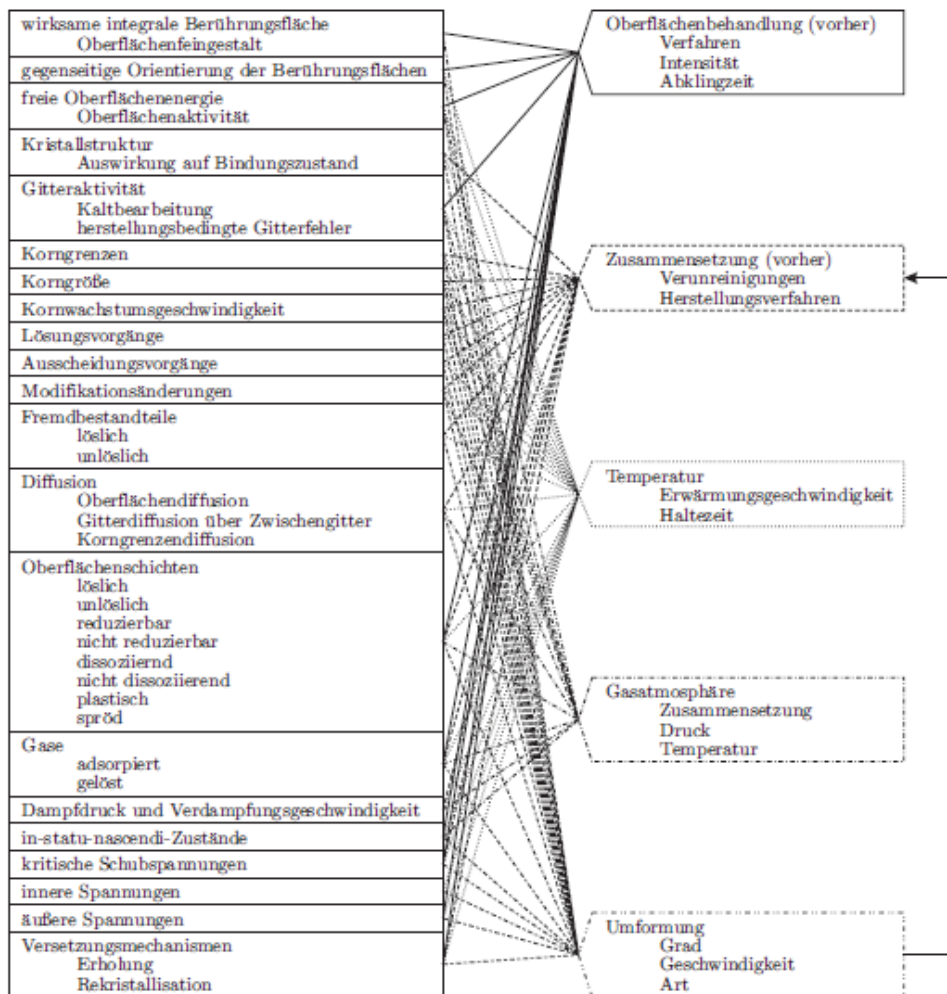


Abbildung 6: Einwirkung technisch vorgegebener Größen auf die den Bindungsvorgang beeinflussenden Faktoren [9]

### 2.1.5 Materialpaarung

Als Faustregel gilt: Gibt es von zwei Metallen eine Mischkristallreihe, so lassen sie sich Kaltverschweißen und somit auch Walzplattieren [6,9]. Als Ausnahmen von der Regel gelten Metalle, die bei Kontakt zu sofortiger Korrosion übergehen, wie beispielsweise Magnesium-Stahl-Paarungen [9,53]. Als weitere Faktoren, ausgehend von der Wahl der Plattierpartner, können die unterschiedlichen Festigkeiten der Materialien und somit ihre differente Längung beim Walzen, ihre unterschiedlichen Gitterstrukturen und deren Einfluss auf die zu überwindende Energiebarriere, die oftmals stark voneinander abweichenden Eigenschaften der Oxidschichten der Materialien und die damit einhergehende Oxidinseldichte, sowie die möglicherweise weit auseinanderliegenden Diffusionskoeffizienten der Materialien, genannt werden. [6,8,17,29,33,35,43,68]

### 2.1.6 Temperatur

Unter den Überbegriff ‚Temperatur‘ fallen in diesem Zusammenhang mehrere Herstellungsparameter bzw. Prozessschritte. Einerseits besteht beim Walzplattieren die Möglichkeit eines Vorwärmprozesses - dieser wird vor allem dann angewendet, wenn anlagenbedingt keine Warmumformung im engeren Sinn durchgeführt werden kann [50], oder wenn bestimmte Besonderheiten der Werkstoffe zu berücksichtigen sind (z. B. hexagonales Magnesiumgitter [30]). Während des eigentlichen Umformprozesses entsteht Umformwärme, diese ist primär das Resultat der Reibungsdissipation [36]. Generell erfolgt dabei eine Unterteilung der Walzplattierprozesse in Kalt- und Warmwalzplattieren [8]. Wie bei der standartmäßigen Aufgliederung von Umformverfahren, bezieht sich diese Titulierung nicht auf eine statisch definierte Temperaturschwelle, sondern auf das Überschreiten bzw. Nichtüberschreiten der Rekristallisationstemperaturen der Einsatzmaterialien [16].

Als Faustformel für die Rekristallisationstemperatur von Metallen gilt [16]:

$$T_{\text{Rex}} = 0,4 * T_S$$

$T_{\text{Rex}}$  ... Rekristallisationstemperatur [°C oder K]

$T_S$  ... Schmelztemperatur [°C oder K]

Liegt die Vorwärm- oder Umformtemperatur über der Rekristallisationstemperatur kommt es im Werkstoff zu diffusionsgesteuerten Platzwechsel- sowie Erholungsvorgängen [9]. Einerseits können so vorteilhafte Verbindungszonen zwischen den Blechpartnern geschaffen und erweitert werden, andererseits kann aber eine zu hohe Energiezufuhr auch zu nachteiligen Effekten führen (z. B. Ausbildung spröder intermetallischer Phasen) [6,9].

Als dritter temperaturrelevanter Prozessschritt gilt die bedingt notwendige Diffusionsglühung nach dem eigentlichen Walzplattiervorgang. Diese erfolgt in einigen Fällen nach dem Kaltplattieren und dient primär zum Ausbau der Verbindungszone über atomare Platzwechselfvorgänge zwischen den Plattierpartnern. [6,13,14]

Weitere Effekte von erhöhten Temperaturen während des Plattierprozesses sind die Steigerung der Verformbarkeit der gewalzten Werkstoffe, eine Verringerung der Eigenspannungen in der Grenzschicht, unterschiedlichste Erholungsvorgänge im Gefüge und eine eventuelle Herabsetzung der Sprödigkeit der Oxidschichten, was sich unter Umständen nachteilig auf den Plattiererfolg auswirken kann. [6,9,11,13,14,17]

### 2.1.7 Diffusionsvorgänge – Kirkendall-Effekt

Der Kirkendall-Effekt [45] beruht auf den unterschiedlichen Diffusionskonstanten zweier aneinandergrenzender Metalle. Kommt es zwischen den Metallpartnern zum Atomaustausch aufgrund von Diffusion, läuft dieser, ausgehend von der jeweiligen Seite, unterschiedlich schnell ab – es liegen unterschiedliche Interdiffusionskoeffizienten vor. Bei stark unterschiedlichen Diffusionskoeffizienten kann es auf einer Seite der Grenzfläche zu einer Stoffanreicherung kommen, während es in der gegenüberliegenden Metallseite zu einer Materialverarmung und zur Ausbildung sogenannter Kirkendall-Löcher kommt (Prinzipiskizze siehe Abbildung 7). Bei der elektronenmikroskopischen Analyse einer Plattierung muss auf eventuell vorhandene Kirkendall-Löcher Rücksicht genommen werden, da die Plattierpartner im Allgemeinen unterschiedliche Diffusionsparameter aufweisen [35,45,48,56].

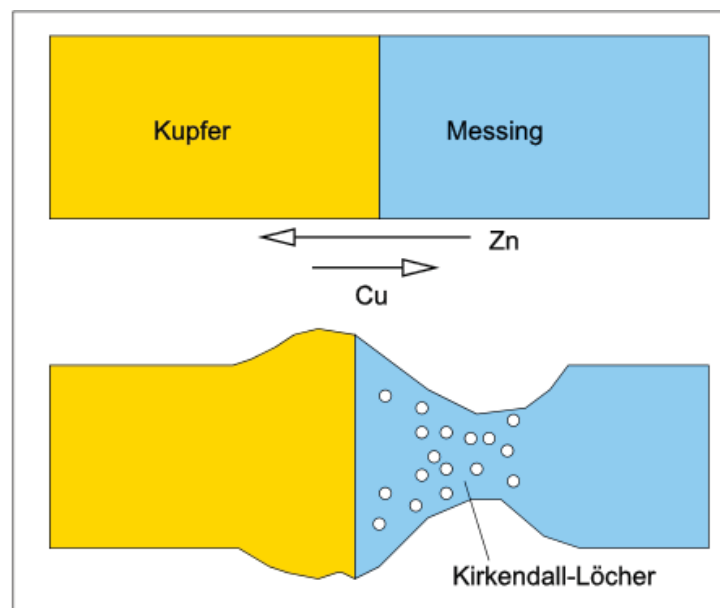


Abbildung 7: Prinzipskizze des Kirkendall-Effekts am Beispiel Kupfer-Zink [48]

### 2.1.8 Oberflächenvergrößerung

Die Oberflächenvergrößerung, im Speziellen die Längung des Walzgutes, gehört zu den wichtigsten Einflussparametern beim Walzplattierprozess. [50,63] Studien belegen, dass generell eine bestimmte Mindestoberflächenvergrößerung notwendig ist, um eine Verschweißung zwischen den Metallen zu gewährleisten [6,9]. Die Haftfestigkeit zwischen den Verbundpartnern hängt dabei entscheidend von der mikroskopischen und nicht von der makroskopischen Oberflächenvergrößerung ab [9] (Vergleichende Darstellung u. Abbildung 8).

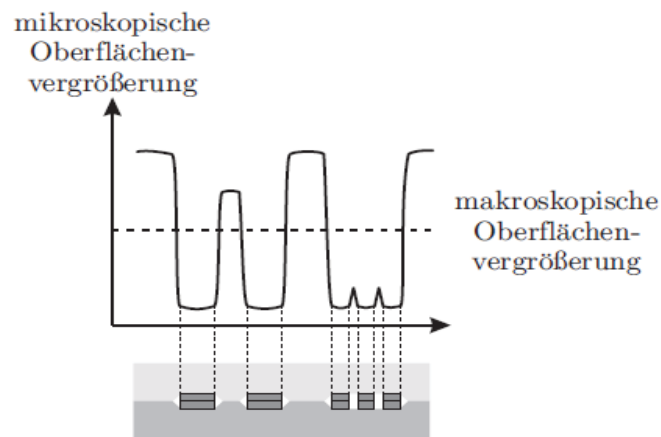


Abbildung 8: Vergleich zwischen der mikroskopischen und der makroskopischen Oberflächenvergrößerung bei der Umformung [9]

Durch die Längung des Walzgutes und die dazu aufgewendeten Kräfte kommt es zu einer Rissinitialisierung in den spröden Oxidoberflächen der plattierten Werkstoffe. Weitere Krafteinwirkung und gegebenenfalls Relativbewegungen zwischen den Plattierpartnern führen zu einem Voranschreiten der Risse, bis die Oxidschichten in einzelne Oxidinseln zerfallen und jungfräuliche Metalloberflächen in den Vordergrund treten. [6,9]

Bay [6] konnte in seiner Arbeit beweisen, dass die Mindestoberflächenvergrößerung, die zur Initiierung des Plattiervorganges notwendig ist, mit steigendem Normaldruck beim Walzen sinkt.

### 2.1.9 Oberflächenrauigkeit

Wie in Abbildung 2 und 3 gezeigt wird, haben zwei gegenüberliegende Rauigkeitsspitzen das Potential sich gegenseitig abzuscheren und somit neue, reaktive Metalloberflächen freizulegen [9]. Liut et al. [39] untersuchten in ihrer Arbeit den Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf die Qualität von Walzplattierverbunden. Messungen ergaben dabei ein definiertes, mate-

rialunabhängiges Wertefenster für die optimale Oberflächenrauigkeit ( $R_a=0,03-0,58 \mu\text{m}$ ) [9]. Das beim Walzplattieren häufig zur Oberflächenvorbehandlung eingesetzten Bürsten der Metallbleche (Details siehe Kapitel 2.1.10) kann unter anderem zur Einstellung einer erhöhten Oberflächenrauheit dienen [9,38,39].

### 2.1.10 Oberflächenvorbehandlung

Wie in den vorangegangenen Kapiteln angeführt, haben die auf den Grundmetallen aufgewachsenen Oxidschichten großen Einfluss auf die finale Haftfestigkeit zwischen den Plattierpartnern [9]. Diese Oberflächen- oder Oxidschichten können bei genauerer Betrachtung in verschiedene Layer unterteilt werden (siehe Abbildung 9).

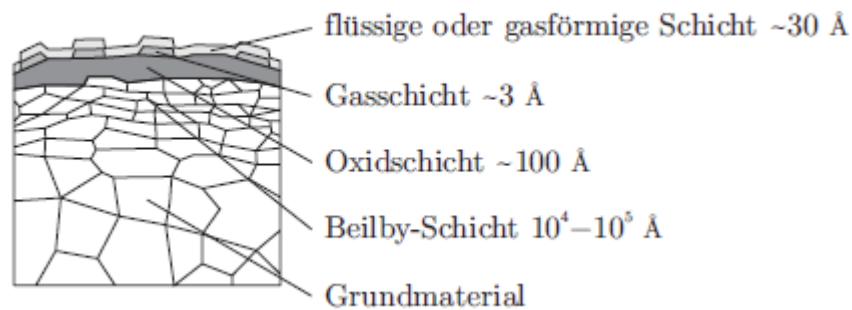


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Oberflächenschichten [9]

Die Kontaminationsschicht (flüssig oder teilweise gasförmig) kann organische Verunreinigungen (z. B. Öle oder Fette) oder lose Bestandteile (z. B. Stäube) enthalten und muss unter allen Umständen vor dem Plattieren aus der Grenzzone entfernt werden [9]. Dafür eignet sich primär eine chemische Reinigung mittels Azeton (Entfettung) [6,9,67,69] oder andere Reinigungsverfahren aus der Metallographie (z. B. Ultraschallreinigung), wobei letztere nur sehr selten zum Einsatz kommen [9].

Der zweite Schritt in der Oberflächenvorbehandlung ist das Bürsten der Metalloberflächen. Dieser Fertigungsschritt erfolgt häufig unter dem Einsatz von rotierende Stahlbürsten und verfolgt die primäre Zielsetzung der Entfernung bzw. Beschädigung von störende Oxidschichten [6,9,65,68]. Zudem erhöht der Bürstvorgang die Rauigkeit der Oberfläche - was mit Augenmerk auf die Schichttheorie - eine Verbesserung der Haftfestigkeit durch mehr freigelegte Oberflächen bewirkt. Als weiterer positiver Effekt der Bürstbehandlung gilt die, durch die Bürste eingebrachte, Kaltverfestigung der Oxidschicht. Diese erzeugt härtere, sprödere und somit früher aufplatzende Oxidschichten. [9,59,61,69].

### 2.1.11 Oxidschichten

Auch das mechanische Verhalten der Metalloxidschichten kann für den Plattiererfolg von Bedeutung sein. Entscheidend ist beispielsweise wie spröde eine Oxidschicht bei Umformtemperatur ist und wie einfach sie vom Grundmaterial abplatzt [6,9]. Die auftretenden Oxidinseln sollten möglichst klein sein, um die finale Haftfestigkeit so wenig wie möglich zu beeinflussen [9].

### 2.1.12 Walzgeschwindigkeit

Die Fügezeit stellt keinen bedeutenden Einflussparameter beim Walzplattieren dar [9]. In den meisten Studien kommt es nur zu einer empirischen Festlegung der kritischen Walzgeschwindigkeit.

### 2.1.13 Gitterstrukturen der Plattierpartner

Kubischen Metallen (wie Al, Fe und Cu) werden bessere Kaltverschweißereigenschaften als hexagonalen Metallen (wie Mg, Cd und Zn) nachgesagt [44]. Dies zeigt sich beispielsweise an einer geringeren Mindestoberflächenvergrößerung und einer höheren Haftfestigkeit bei kubischen Plattierpartnern [47,67]. Als Grund dafür wird die höhere Oberflächenenergie bei kubischen Materialien angeführt. Bei hexagonalen Strukturen kann außerdem von einer schlechteren Umformbarkeit bei Raumtemperatur ausgegangen werden [30,44]. In der Literatur werden Plattierverbunden mit unterschiedlichen Kristallstrukturen schlechtere Ergebnisse nachgesagt, als Paarungen mit gleichen Kristallstrukturen [9].

### 2.1.14 Umgebungseinflüsse

Der wichtigste Umgebungseinfluss beim Fügeprozess ist die Gasatmosphäre. Wird der Walzplattierprozess unter Sauerstoffatmosphäre durchgeführt, ist davon auszugehen, dass direkt nach der Bürstbehandlung eine Neuoxidation der Grenzschicht eintritt, was sich gegebenenfalls nachteilig auf die Haftfestigkeit des finalen Werkstoffverbundes auswirken kann [9,50]. Zudem ist das Eindringen von Schmiermitteln in die Bindungszone zu vermeiden, da dies jede Verbindungsausbildung unterbinden würde [9]. Als letzter Einflussfaktor in diesem Bereich gilt die Schmierung zwischen Walzen und Walzgut. Die Aufgabe des Schmiermittelfilms besteht darin, die Reibung zwischen Walzen und Walzgut zu minimieren und Verschleiß und Oberflächenfehlern vorzubeugen. [3,11,17,26,41]

### 2.1.15 Greifbedingung

Ein gewisses Maß an Reibung zwischen Walzgut und Walzen ist notwendig, um die Greifbedingung zu erfüllen und daraus resultierend das Werkstück in die Walze eingezogen wird.

Die Berechnung der Greifbedingung erfolgt über den Einzugswinkel beim Walzen und aufgrund der Oberflächenrauheit des Walzgutes (siehe Abbildung 10 und entsprechendes Gleichungssystem) [16].

$$dF_N \cdot \sin \alpha = \mu \cdot dF_N \cdot \cos \alpha$$

$$\mu \geq \tan \alpha$$

$F_N$  ... Formalkraft

$\alpha$  ... Walzwinkel

$\mu$  ... Reibkoeffizient

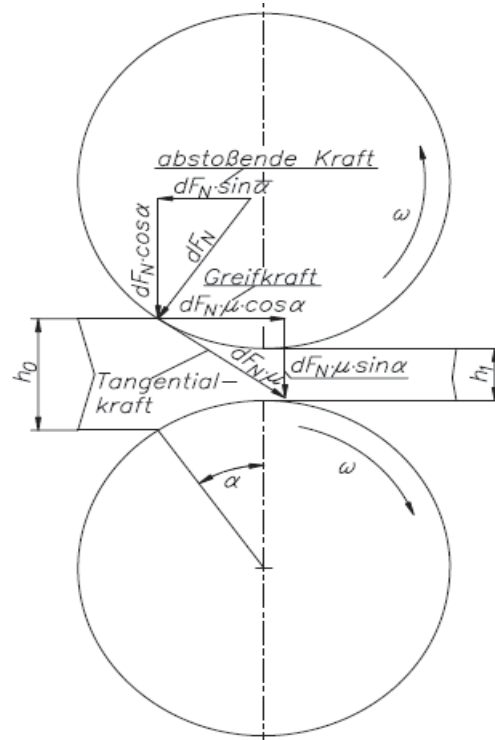


Abbildung 10: Kräfte im Walzspalt beim Greifen [16]

Um die für den Plattiererfolg oft recht hohe Stichabnahme beim ersten Walzschritt erzielen zu können, kann ein Anspitzen des Walzgutes helfen, die Greifbedingung zu erfüllen.

### 2.1.16 Korngröße

Der Korngrößeneinfluss wirkt sich primär auf die finalen mechanischen Kennwerte des Werkstoffverbundes aus und kommt vor allem dann zum Tragen, wenn der Werkstoff über einen längeren Zeitraum einer erhöhten Temperatur ausgesetzt war. Beim Warmwalzplattieren oder bei nachgeschalteter Wärmebehandlungen ist darauf zu achten, dass sich kein Grobkorngefüge innerhalb oder außerhalb der Grenzschicht bildet, da dies die Duktilität des finalen Verbundmaterials herabsetzen würde. [22,51]

### 2.1.17 Rückfederung

Bowden und Rowe [7] begründen die Tatsache, dass härtere Metalle bei RT schwerer zu fügen sind, mit der sogenannten Rückfederung. Diese tritt bei der Entlastung nach dem Verbindungsschritt auf und ist auf das elastische Verhalten der metallischen Verbindungen zurückzuführen.

Experimente zeigen, dass härtere Metalle äquivalente Verbindungsschichten zwischen reinen Metallflächen aufbauen, entsprechend ihrer weicheren Werkstoffklassenkollegen. Jedoch kommt es bei ihnen durch die größere elastische Spannungskompensation zu stärkeren Rückfederungen, welche wiederum für ein Zerstoren der ausgebildeten Verbindungspunkte zwischen den abgesicherten Risspitzen führen. Dementsprechend benötigen härtere Metalle mehr reine Metalloberflächen und somit eine größere Mindestmateriallänge. [6,7,9]

## 2.2 Materialpaarung Aluminium-Magnesium

Wie in den vorigen Kapiteln aufgezeigt, sind viele der charakteristischen Eigenschaften der Metallpartner von entscheidender Bedeutung für das finale Plattierergebnis. In diesem Teil der Arbeit werden die besonderen Merkmale der eingesetzten Materialien - genauer der Magnesiumlegierung AZ31 und der Aluminiumlegierung 1050 - besprochen.

### 2.2.1 Kristallstrukturen

Das hexagonale Kristallgitter der Magnesiumlegierungen birgt für die Umformtechnik weit größere Herausforderungen als das kubisch flächenzentrierte Aluminium. Grundlegend können hexagonale Kristallstrukturen nach ihrem  $c/a$ -Verhältnis charakterisiert werden. Magnesium liegt dabei nahe dem idealen Wert von 1,62. Andere hexagonal aufgebaute Metalle wie Titan und Zirkon liegen entweder über diesem Idealwert oder darunter [22]. Abhängig von diesem Verhältnis sind auch die Gleiteigenschaften – die aktivierten Gleitsysteme bei RT – dieser hexagonalen Systeme. Bei Magnesiumlegierungen sind unter herkömmlichen Bedingungen nur die basalen Gleitebenen aktiviert. Erst bei höheren Temperaturen kommt es zu einem prismatischen und pyramidalen Gleiten – und damit zu einer plastischen Verformung [14] (die Bedingung nach Mises besagt, dass fünf unabhängige Gleitsysteme im Werkstoff notwendig sind um plastische Verformung bewerkstelligen zu können [16]).

Eine weitere Betrachtungsweise dieses Sachverhaltes führt über die Peierlsspannung. Sie ist als Kenngröße für die Verformbarkeit eines Werkstoffs relevant, da sie beschreibt ab welchem Spannungswert die einzelnen Kristallebenen in einem System aneinander abgleiten können. In den dichtest gepackten Ebenen des kubisch flächenzentrierten Aluminiumkristalls ist die Peierlsspannung relativ gering. In den pyramidalen und prismatischen Ebenen des hexagonalen Gitters gibt es jedoch keine dichteste Kugelpackung. Hier sind die Atomabstände größer und es bedarf eines höheren Kraftaufwandes die Ebenen aneinander abgleiten zu lassen. Übersteigt die Peierlsspannung die Spaltbruchspannung so kommt es noch vor dem Einsetzen von plastischer Verformung zu spröden Werkstoffversagen. Durch thermische Aktivierung kann das Peierlspotential leichter überwunden werden, es gilt also wieder: Magnesiumwerkstoffe können nur bei erhöhten Temperaturen ( $T_S * 0,4$ ) plastisch verformt wer-



den. [22] Bei Magnesiumlegierungen liegt statt eines Schmelzpunktes ein Schmelzinterfall vor. Bei den AZ31-Legierungen rangiert dieser zwischen 420-620 °C [30].

Das kubisch flächenzentrierte Aluminium ist bereits bei RT problemlos umzuformen, die thermische Aktivierung setzt hierbei lediglich die benötigte Walzkraft herab und beschleunigt Diffusionsvorgänge. [22,30,31]

## 2.2.2 Mischkristallreihe und auftretende Phasen

Das Phasendiagramm von Aluminium und Magnesium ist in Abbildung 11 dargestellt. Für das Walzplattieren sind der Aluminiummischkristall ( $\alpha$ ), der Magnesiummischkristall ( $\delta$ ), sowie die intermetallischen Phasen  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  und  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  (beide kubisch raumzentriert) von Bedeutung. [25,39,44]

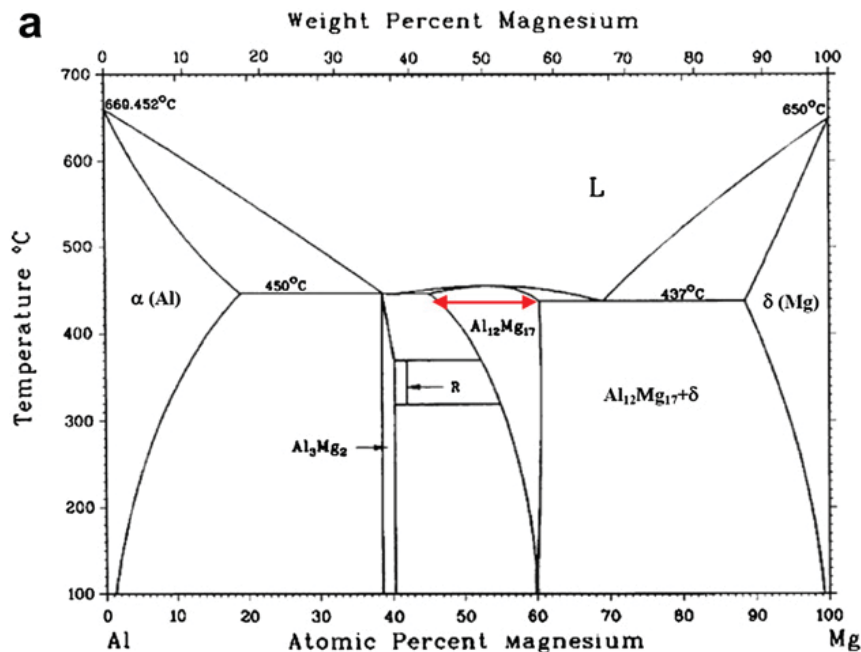


Abbildung 11: Phasendiagramm Al-Mg mit hervorgehobener  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ -Verbindung [25]

Die  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$ - und  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ -Phasen entstehen in der Verbindungs- bzw. Reaktionszone zwischen den Walzpartnern durch atomare Platzwechsellvorgänge. Dabei gilt, je höher die Aufschmelzung des Aluminiumwerkstoffs, umso mehr  $\text{Mg}_2\text{Al}_3$ -Phase wird gebildet. Die Ausbildung der  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ -Phase ist primär von der Geschwindigkeit der Diffusion abhängig. Generell ist der Temperaturanstieg beim Walzplattieren – und somit die Aufschmelzung der Aluminiumschicht – nicht so ausgeprägt, wie es beispielsweise beim Plattieren durch Twin-roll-casting [2,24]. Walzplattierverbunde beinhalten deshalb größtenteils  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ -Phasen, die wie in Abbildung 11 dargestellt ist, bei erhöhten Temperaturen ein wesentlich weiteres Phasengebiet als die streng stöchiometrische  $\text{Mg}_2\text{Al}_3$ -Phase aufweisen. [2,25,44]

Wenn es in der Verbundzone zur Ausbildung von intermetallischen Phasen kommt, so wachsen sie entgegen der Richtung der Wärmeabfuhr und somit in einer zeilenförmigen Struktur (siehe Abbildung 12). [2,44]

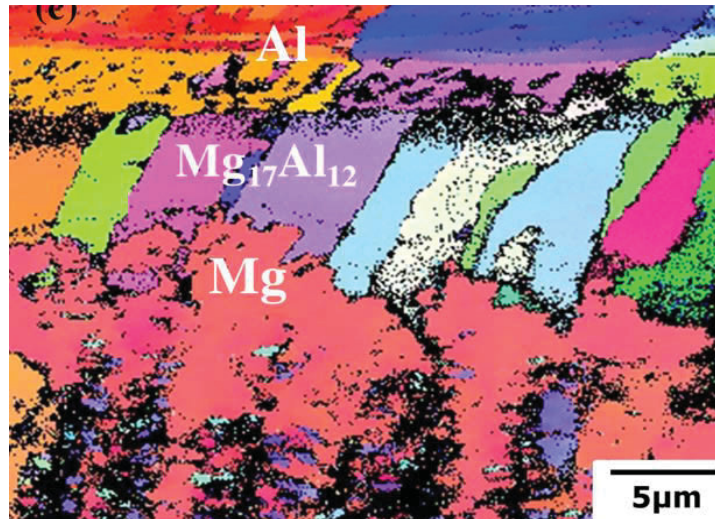


Abbildung 12: Struktur in der Verbindungszone zwischen Aluminium- und Magnesiumblechen nach dem Plattieren [2]

Die gebildeten intermetallischen Phasen ( $Mg_2Al_3$  oder  $Mg_{17}Al_{12}$ ) sind spröde und können zu einer Rissinitialisierung in der Verbindungszone führen. Die Härte von  $Mg_{17}Al_{12}$  ist im Temperaturbereich von ca. 300 °C nur geringfügig höher, als die von reinem Magnesium bei dieser Temperatur. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass sich beide Phasen bei 300 °C ähnlich verhalten (eine ähnliche Schlussfolgerung gilt auch bei RT). Das wiederum bedeutet, dass bei 300 °C die Dickenabnahme der Reaktionszone (Anteil an gesamter Stichabnahme) teilweise von der Verformung der intermetallischen Phasen herrühren kann. [2]

### 2.2.3 Bindezone – Verbindungsschicht

Ein walzplattierter Werkstoffverbund sollte den Anforderungen der nachgeschalteten Umformung (e. g. Halbzeugherstellung durch Tiefziehen) gewachsen sein. Dabei dürfen keine Abschälungen oder Risse in der Verbindungszone auftreten. Inwieweit dies gewährleistet ist, hängt vor allem von der Bindezone zwischen den walzplattierten Blechen ab. [51]

Die Charakteristika der Verbindungszone sind von den dort auftretenden Phasen, deren Textur und Anordnung, von eventuell auftretenden Verunreinigungen und anderen Bindungshemmern, der allgemeinen Kornstruktur, der individuellen Bindefestigkeit zwischen den Verbundstoffen, Stärke der intermetallischen Diffusion, eventuell vorhandenen Diffusionsfolgen (z. B. Kirkendall-Löchern), den Oxidinseln (Größe, Verteilung), eingebrachten Eigenspannungen und natürlich von der Morphologie der Übergänge abhängig. [5–7,9,10,13,14,18,69]

Wie bereits zuvor erwähnt besteht die Verbindungszone von walzplattierten Mg-Al-Verbunden aus den Magnesium- und Aluminiummischkristallen und gegebenenfalls aus der intermetallischen Phase  $Mg_{17}Al_{12}$ . In seltenen Fällen kann auch die  $Mg_2Al_3$ -Phase vorliegen. [2,68,69]

Abbildung 13 zeigt den Konzentrationsübergang in der Verbindungszone einer Mg-Al-Walzplattierung. Der gleichmäßige, spiegelverkehrte Verlauf deutet auf die gleichmäßige Verteilung von  $\alpha$ - und  $\delta$ -Mischkristallen hin [69], über die Präsenz von intermetallischen Phasen kann auf diese Weise keine klare Aussage getroffen werden – dafür eignen sich Härteverläufe normal zur Bindungszone [68].

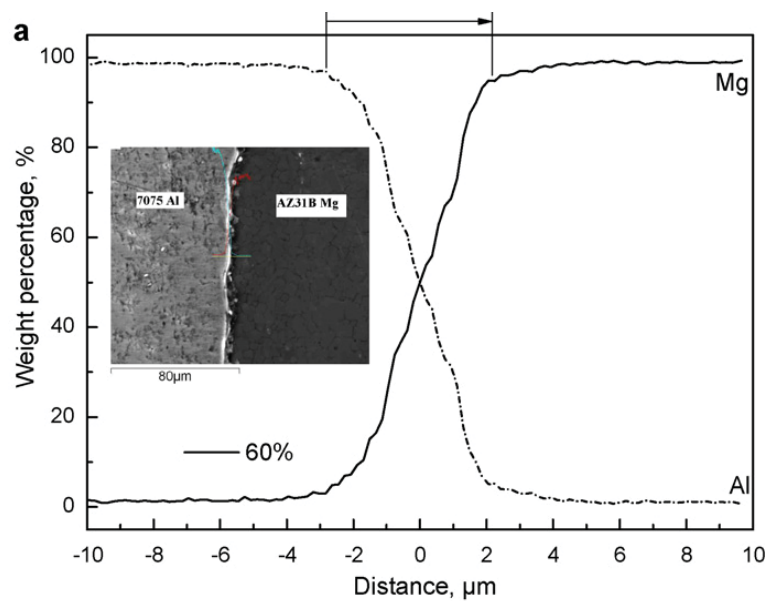


Abbildung 13: Konzentrationsverlauf von Magnesium und Aluminium in einer Walzplattierverbindungszone [69]

### 3. Experimentelle Betrachtungen

Der vorliegende experimentelle Teil der Arbeit gliedert sich in drei Bereiche auf. Im ersten Teilgebiet erfolgt die Darstellung der Vorversuchsreihe, in der es vor allem um die prinzipielle Machbarkeit eines Mg-Al-Walzplattierverbundes mit den gegebenen Versuchsanlagen geht. Der Hauptteil stellt die Optimierung des Werkstoffverbundes mittels unterschiedlicher Werkstoffprüfverfahren dar. Im abschließenden Versuchsblock geht es um die Verformbarkeit des optimierten Werkstoffverbundes und das ideale Prozessfenster für die weiteren Verarbeitungsschritte.

#### 3.1 Eingesetzte Werkstoffe

Nachfolgend werden die in dieser Arbeit verwendeten Leichtwerkstoffe näher beschrieben. Als Basiswerkstoff wird dabei die Magnesiumknetlegierung AZ31B und zur Beschichtung die 1050-Aluminiumlegierung herangezogen.

##### 3.1.1 Magnesiumbleche

Die AZ31-Legierungen gehören zu den handelsüblichen und meisteingesetzten Magnesiumknetlegierungen. Sie zeichnen sich durch gute Raumtemperaturfestigkeit, verbesserte Umformeigenschaften und erhöhte Korrosionsbeständigkeit gegenüber reinem Magnesium aus [30]. Vom Hersteller der in dieser Arbeit eingesetzten Bleche – Salzgitter Magnesium-Technologie GmbH (SZMT) – werden zudem eine gute Bearbeitbarkeit und gute Schweißseigenschaften bescheinigt. Ergänzt werden diese Eigenschaften mit dem für Magnesiumlegierungen standartmäßigen hohen Dämpfungsverhalten, sowie guter elektrischer und thermischer Leitfähigkeit [43,49].

Der Buchstabe „B“ in der Legierungsbezeichnung, weist auf die Entwicklungsstufe der Legierung hin. Je höher der Buchstabe (aktuell von AZ31A bis AZ31D) ist, desto reiner ist die Legierung. So ist beispielsweise die Legierung AZ31A aufgrund ihrer Verunreinigungen und der dadurch erhöhten Korrosionsanfälligkeit, nicht mehr in Verwendung. Die Zusatzbezeichnung „B“ bedeutet, dass in der Legierung maximal 0,35 % Cu enthalten sein dürfen. [30]

Tabelle 1 zeigt die grundlegende Zusammensetzung von AZ31-Legierung in Gew.% auf. Tabelle 2 enthält die Standardwerte der physikalischen Eigenschaften dieser Knetlegierung.

Tabelle 1: Zusammensetzung der AZ31-Legierung in Gew.% [57]

	<b>Al</b>	<b>Zn</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>Fe</b>	<b>Cu</b>	<b>Ni</b>	<b>Ca</b>
<b>AZ31</b>	2,5-3,5	0,5-1,5	0,05-0,4	0,1	0,03	0,1	0,005	0,04

Tabelle 2: Physikalische Eigenschaften der AZ31-Legierung [49]

Eigenschaften	Wert
Spezifisches Gewicht	1,78 g/cm <sup>3</sup>
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	26,8 x 10 <sup>-6</sup> 1/K
spezifische Wärmekapazität	1.040 J/(kg.K)
Elastizitätsmodul	452.000 MPa
Elektrische Leitfähigkeit	92 nΩm
Schmelzintervall	566–632 °C

Die eingesetzten Hauptlegierungselemente in AZ31 Aluminium und Zink tragen deutlich zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften der Legierung bei. Aluminium ist eines der wichtigsten Legierungselemente in Magnesiumlegierungen. Durch Bildung von Mischkristallphasen kommt es zu einer Steigerung der Zugfestigkeit und Härte des Materials. Allerdings ist die festigkeitssteigernde Wirkung des Aluminiums nur bis maximal 120 °C vorhanden, da es bei höheren Temperaturen zu einer Erweichung der Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>-Phase kommt. Weitere Vorteile des Legierungselements Aluminium sind die Verbesserung der Korrosionseigenschaften in einer Magnesiumlegierung, sowie eine Steigerung der Giessbarkeit. Als nachteilig kann die erhöhte Neigung zur Mikroporosität angeführt werden. Binären MgZn-Legierungen kommt in der technischen Anwendung keine Bedeutung zu. Zink wird immer im Zusammenhang mit Aluminium legiert und führt zu einer Festigkeitssteigerung. Das zulegierte Mangan erhöht die Korrosionsbeständigkeit von Magnesium, indem metallische Verunreinigungen in intermetallische Phasen umgewandelt werden und aus der Schmelze ausgeschieden werden [15, 28,30,37,43].

Die in dieser Arbeit verwendeten Magnesiumbleche wurden im weichgeglühten Zustand „O“ eingesetzt. Dabei liegen sehr geringe Restspannungen und hohen Ebenheiten vor. [49]

Aus der Produktinformation des Herstellers SZMT können folgende ergänzende Informationen gewonnen werden [49]: „AZ31-Bleche zeigen eine nur begrenzte Kaltverformbarkeit, die Warmverformungsfähigkeit ist bei Temperaturen knapp oberhalb 200 °C hingegen hervorragend.“

### 3.1.2 Aluminiumbleche

Zu der 1xxx Serie zählen Reinaluminium, Reinstaluminium und die AlFeSi-Legierungen. Die Eigenschaften der 1xxx-Legierungen hängen von den in fester Lösung befindlichen Elemen-

ten und den auftretenden binären und höheren Phasen ab. Generell steigt die Festigkeit mit dem Gehalt von Beimengungen stetig an, wobei wiederum die elektrische Leitfähigkeit des Werkstoffs gesenkt wird. Zu den wichtigsten Eigenschaften dieser Legierungsgruppe gehören gute Schweißeigenschaften, hohe Korrosionsbeständigkeit und sehr gute elektrische Leitfähigkeit. Zu den Haupteinsatzgebieten dieser Aluminiumklasse gehören Aluminiumfolien, Rohre und alle Hochglanzprodukte [31,32].

Die grundlegende chemische Zusammensetzung und die physikalischen Grundeigenschaften der in dieser Arbeit eingesetzten 1050-Legierung sind aus Tabelle 3 und Tabelle 4 zu entnehmen.

Tabelle 3: Zusammensetzung der Al1050-Legierung in Gew.% [31]

	<b>Si</b>	<b>Fe</b>	<b>Cu</b>	<b>Mn</b>	<b>Mg</b>	<b>Zn</b>	<b>V</b>	<b>Ti</b>
<b>Al1050</b>	0,25	0,40	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,03

Tabelle 4: Physikalische Eigenschaften der 1050-Legierung [31]

<b>Eigenschaft</b>	<b>Wert</b>
Molare Masse	26,9815 g/mol
Dichte	2,6989 g/cm <sup>3</sup>
Gitterstruktur	kfz
Stapelfehlerenergie	200 * 10 <sup>(-7)</sup> J/cm <sup>3</sup>
E-Modul	66,6 GPa
Schubmodul	25,0 GPa
Poissonsche Zahl	0,35
Schmelzpunkt	660,2 °C
Wärmeleitfähigkeit	235 W/mK
Standardpotential	- 1,67 V

Für die 1050-Legierungen werden im „Aluminium-Taschenbuch 2“ Warmumformtemperaturen im Bereich von 300 – 550 °C angeführt [31]. Dies deckt sich weitgehend mit dem Intervall der für die Magnesiumumformung notwendig ist.

### 3.1.3 Wärmebehandlung der Aluminiumbleche

Die Aluminiumbleche werden vor dem eigentlichen Plattiervorgang auf die gewünschte Dicke gewalzt (0,5–3 mm). Dazu muss die vorhandene Legierung Weichgeglüht werden. Das Weichglühen erfolgt über 2 h bei 250 °C und anschließender Ofenabkühlung.

## 3.2 Probenfertigung

Vor allem während der Vorversuchsreihe erfolgt eine flexible und zeitnahe Anpassung der Probengeometrie und -vorbereitung, um einen festen Walzplattierverbund der beiden Metalle herstellen zu können. Die Wärmespeicherung für die Magnesiumumformung, die Greifbedingung für Sandwich-Verbunde und das vorgeschaltete Kompaktieren der Probenpakete stellen dabei die größten Herausforderungen dar.

### 3.2.1 Dimensionierung

Mit Augenmerk auf die im Anschluss durchzuführenden Testverfahren erfolgt die Probendimensionierung betreffend Breite und Länge der Walzpakete in zwei unterschiedlichen Formaten. Während für die Blechdicken wesentlich mehr Variationsmöglichkeiten (über die Dicke und Anordnung der Aluminiumbleche) vorliegen.

„Kleine Proben“ (für Vorversuchsreihe, Hin- und Herbiegeversuche, Zugversuche):

30 mm x 100 mm x Summe aus den jeweiligen Blechdicken

„Große Proben“ (für Näpfchenversuche):

50 mm x 130 mm x Summe aus den jeweiligen Blechdicken

Der Magnesiumgrundwerkstoff weist dabei immer eine Dicke von 3 mm auf. Die Aluminiumbleche variieren in ihrer Dicke von 0,5–3 mm. Bei der Anordnung kann zwischen zweischichtigen und dreischichtigen Verbunden (Sandwich-Strukturen) unterschieden werden.

### 3.2.2 Oberflächenvorbehandlung

Um einen erfolgreichen Walzverbund herstellen zu können, müssen sämtliche Oberflächen von organischen Rückständen und losen Oxidpartikeln gereinigt sein [9,34]. Im ersten Reinigungsschritt erfolgt eine mechanische Abreinigung der Bleche mittels Reibschwamm. Anschließend werden eventuell gegebene organische Verunreinigungen und Schmiermittelrückstände mittels Aceton entfernt. [9,33,34]

Das Bürsten der gereinigten Oberflächen gehört zu den gängigen Verfahren in der industriellen Walzplattiertechnik [34]. Bei der Oberflächenpräparation im Labormaßstab werden handelsübliche Stahlbürsten auf einen Akkubohrer aufgesetzt. Die Blechfixierung erfolgt in einem Schraubstock. Die Gleichmäßigkeit der eingebrachten Bürstriefen liegt in den Händen des Technikers. Nach der Oberflächenbehandlung müssen die Bleche mit Druckluft gereinigt werden, damit keine losen Metallrückstände den Plattierverbund stören. Anschließend erfolgt

eine erneute Reinigung durch Aceton. Vor allem bei den Magnesiumspänen bzw. -stäuben muss in der Verarbeitung und Lagerung besondere Vorsicht walten, da sich diese sehr leicht entzünden können [30].

### 3.2.3 Herstellung der „Walzpakete“

Vorversuche haben gezeigt, dass es nicht möglich ist, den vorgewärmten Magnesiumwerkstoff mit einer kalten Walze erfolgreich umzuformen. Sowohl Aluminium als auch Magnesium sind sehr gute Wärmeleiter [30,31] und geben die gespeicherte Wärmeenergie sofort an die wesentlich größer dimensionierten Walzen ab. Sobald der Magnesiumwerkstoff unter seine homologe Temperatur (ca. 225 °C) abkühlt, kann keine plastische Verformung mehr erfolgen, es kommt zum spröden Werkstoffversagen und somit zu einem „Zerbröseln“ des Magnesiumgrundwerkstoffs. Weil am Lehrstuhl für Umformtechnik kein geheiztes Walzgerüst zur Verfügung steht, werden sämtliche Mg-Al-Paarungen in Stahlpakete eingeschweißt. Durch die Stahl-Ummantelung wird die Wärmemenge für den Walzprozess ausreichend lange gespeichert.

Um ein „Hinausdrücken“ des mittleren Bleches während des Walzens zu verhindern, müssen die Bleche miteinander verschweißt werden. Dazu wird ein simples Punktschweißverfahren herangezogen, bei dem es über den Ohm'schen Widerstand im Material zur lokalen Erwärmung und damit einhergehender punktueller Aufschmelzung kommt. Dabei ist auf die hohe Wärmeleitfähigkeit der Bleche zu achten (Handhabung mittels Zange oder Handschuhe). Außerdem ergibt sich aufgrund der stark unterschiedlichen Leitfähigkeit von Magnesium und Aluminium eine ausgeprägte Neigung zum Aufschmelzen der Magnesiumgrundplatte. Durch beide Einflussfaktoren werden die grundlegenden Eigenschaften des fertigen Walzverbundes in der Schweißzone stark verfälscht. Die Punktschweißungen müssen also so gesetzt werden, dass sie bei einem Zuschneiden der Probengeometrie für spätere Werkstoffcharakterisierungsversuche wegfallen (Positionierung siehe Abbildung 14).

Entsprechend der Greifbedingungen beim Walzvorgang müssen die Walzpakete zusätzlich „angespitzt“ werden. Dazu werden die dicken Magnesiumbleche mittels Schleifgerät an der Spitze ausgedünnt und zusätzlich die dünneren Aluminiumbleche vor die Magnesiumkante gezogen und dort verschweißt (siehe Abbildung 14). Die Verjüngung des Querschnittes überträgt sich dabei auch auf die außenliegenden Stahlbleche.



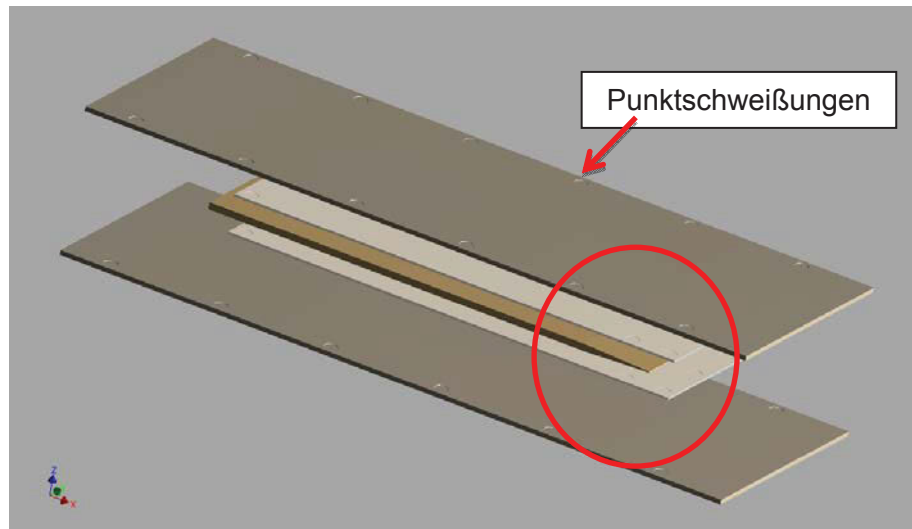


Abbildung 14: Aufbau eines Walzpaketes mit Positionierung der Punktschweißungen – die rote Markierung zeigt den für die Erfüllung der Greifbedingung relevanten Bereich

Um ein Aufplattieren der Aluminium- bzw. Magnesiumbleche auf die Stahlummantelung verhindern zu können, muss eine Zwischenschicht eingebracht werden. Dazu eignen sich vor allem Sprühschmiermittel. In den Vorversuchsreihen wurde sowohl weißer als auch schwarzer Graphitspray eingesetzt. Lediglich der schwarze Graphitspray hat sich bewährt, da das Bornitrid eine zu geringe Schmierwirkung bei den gegebenen Umformtemperaturen von ca. 350 °C aufweist. Beim Auftragen des Schmiermittelfilms ist besonders darauf zu achten, dass der Film nicht an jene Stellen gelangt, die zur Punktschweißung vorgesehen sind. Dies kann durch ein Abkleben (Kreppband) der betroffenen Stellen vor dem Besprühen verhindert werden.

### 3.2.4 Vorwärmen der Blechpakete

Zum plastischen Verformen von Magnesium ist eine Minimaltemperatur von ca. 225 °C notwendig. Die Walzpakete müssen vor dem eigentlichen Walzvorgang auf eine ausreichend hohe Temperatur gebracht werden. Dies erfolgt mittels Umluftofen (Carbolite HT6/28 – siehe Abbildung 15) mit einer variablen Temperatureinstellung von 300-450 °C. Überprüft wird die Temperatur mittels zwischen den Blechen aufgeschweißten Typ-K-Thermoelementen. Sowohl die Temperatur als auch die Haltezeit haben sich als ausschlaggebend für die erfolgreiche Walzplattierung herausgestellt.



Abbildung 15: Umluftofen am Lehrstuhl für Umformtechnik  
Carbolite HT6/28

### 3.3 Walzvorgang

Der eigentliche Walzplattierschritt erfolgt am Versuchswalzgerüst des Lehrstuhls für Umformtechnik. Beide Walzen haben einen Durchmesser von 203 mm. Die maximal aufzubringende Walzkraft beträgt 300 kN und das maximale Walzmoment liegt bei 2.500 Nm. Die Aufzeichnung der Messwerte erfolgt über ein speziell dafür implementiertes LabView-Programm.

### 3.4 Prüfverfahren während der Vorversuche

Der ersten Phase der Verbundentwicklung liegen eine allgemeine Festlegung der Machbarkeit und die erste Auslotung der Verformungsparameter zugrunde. Dazu werden vor allem schnelle und aussagekräftige Prüfverfahren benötigt, die es ermöglichen, die Verbunde sofort nach deren Auskühlung auf ihre Qualität zu überprüfen. Darunter fallen die optische Überprüfung auf Risse, der Fall-, der Falt- und der Aufkeilttest.

#### 3.4.1 Die optische Analyse

Die optische Analyse liefert erste Aufschlüsse über das Ergebnis des Walzplattierprozesses. Vor allem Risse (siehe Abbildung 16) aufgrund zu geringer Umformtemperaturen können sofort Aufschlüsse bezüglich der Prozessparameter liefern.

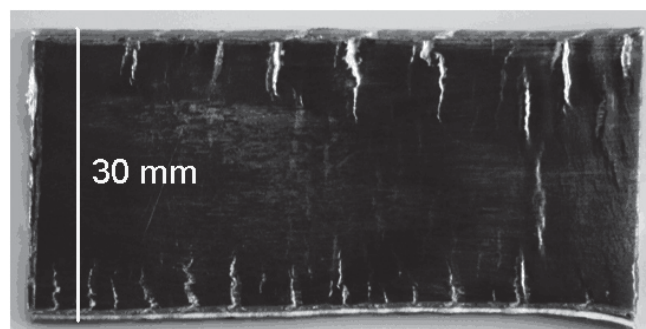


Abbildung 16: Walzplattierverbund mit Rissbildung an den Rändern [50]

### 3.4.2 Der Falltest

Dabei werden die Bleche aus einer definierten Höhe (ca. 1 m) auf den Boden fallen gelassen. Zerfällt der Verbund, ist er unbrauchbar.

### 3.4.3 Der Faltest

Der Faltest erfolgt nach dem Falltest und gibt bereits effektivere Aussagen über die Qualität des Verbundes wieder. Beim Faltest wird der Verbund über eine Kante gebogen und anschließend weiter verformt. Kommt es zu keinem Ablösen der einzelnen Schichten, kann der Verbund positiv bewertet werden.

### 3.4.4 Der Aufkeiltest

Beim Aufkeiltest wird ein Keil zwischen die Bleche getrieben. Manche Verbunde können auf diese Weise sehr einfach getrennt werden, bei anderen ist es eher schwierig bis unmöglich.

Alle Testverfahren der Vorversuchsreihe sind subjektive, stark vom jeweiligen Anwender abhängige Verfahren und sollen lediglich zu einer zeitnahen Informationsquelle für die weitere Ausrichtung der laufenden Walzversuche, durch eine schnelle Charakterisierung des Verbundes, führen.

### 3.4.5 Parametervariation während der Vorversuchsreihe

Im Zuge der Vorversuchsreihe kommt es zu einer Evaluierung der möglichen Temperaturführung (Ofentemperatur und Haltezeit), der Mindeststichabnahme und der allgemein notwendigen Probenpräparation.

## **3.5 Optimierung des Walzplattierprozesses – Hauptversuchsreihe**

Die Optimierung des Walzplattierprozesses erfolgt mittels Variation der unterschiedlichen Einflussparameter (e. g. Walzkraft, Oberflächenvorbehandlung) und unter Zuhilfenahme technologischer Prüfverfahren (e. g. Hin- und Herbiegeversuche, Abschälversuche).

### 3.5.1 Untersuchte Einflussparameter

Die einzelnen Einflussparameter können nicht einfach gesondert betrachtet werden. So hat beispielsweise die Umformtemperatur Einfluss auf die Mindeststichabnahme und somit auf die notwendige Walzkraft. Die Wechselwirkungen der einzelnen Einflussparameter sind in Abbildung 5 schematisch dargestellt. Zur Analyse und Optimierung dienen in dieser Arbeit

die Temperatur, die Oberflächenvorbehandlung, die Stichabnahme, sowie die Schichtanordnung.

### 3.5.2 Prüfmethoden in der Hauptversuchsreihe

Die für die Optimierung des Walzverbundes eingesetzten Prüfverfahren gehören zu den technologischen Prüfverfahren und sind nicht oder nur geringfügig geometrieabhängig.

### 3.5.3 Untersuchungen mittels Lichtmikroskop

Die lichtmikroskopischen Aufnahmen dienen zur genauen Analyse des Plattiererfolgs. Etwai-ge Rissbildung an der Grenzschicht zwischen der Aluminium- und der Magnesiumschicht sind auszuschließen. Durch eventuelle Rekristallisationsvorgänge veränderte Gefügestrukturen bedürfen einer genauen Dokumentation. Die optische Analyse erfolgt mittels invertierten metallographischen Mikroskops der Marke Olympus.

### 3.5.4 Ätzbehandlung

Das Ätzen der Verbundoberfläche erfolgt bei Raumtemperatur für 10-40 Sekunden in einer Mischung aus Ethylenglykol, Essigsäure und Salpetersäure [27]. Die Ätzung greift Magnesium und Aluminium unterschiedlich stark an und ermöglicht es, lediglich die Kornstruktur der AZ31-Legierung darzustellen.

### 3.5.5 Konvokalmikroskopie

Durch den zuvor genannten stark unterschiedlichen Ätzangriff auf beide Einsatzmaterialien entsteht bei der optischen Mikroskopie eine Stufe zwischen den einzelnen Verbindungspartnern, die bei herkömmlichen Lichtmikroskopen zu einer schlechten Auflösung der Grenzschicht führt. Um diese Problematik zu umgehen, kann ein Konvokalmikroskop (Alicona Infinite Focus G4 – siehe 17) eingesetzt werden und die Verbindungszone trotz unterschiedlichen Ätzangriffs durch 3D-Ansichten gut abgebildet werden.

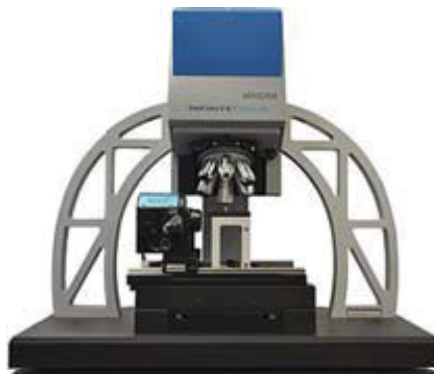


Abbildung 17: Alicona Infinite Focus G4

### 3.5.6 Hin- und Herbiegeversuche

Beim Hin- und Herbiegeversuch nach EN ISO 7790 wird eine senkrecht an einem Ende eingespannte Probe abwechselnd um  $\pm 90^\circ$  über Zylinder mit definierten Radien gebogen (siehe Abbildung 18 und 19). Dieser Versuchsaufbau stellt eine verschärfte, zyklische Belastung dar, die eine deutliche Beurteilung der gegebenen Hafffestigkeit und zugleich eine qualitative Aussage über die Verformbarkeit des Werkstoffverbundes bei niedrigen Temperaturen ermöglicht. [9,50] Um eine genaue Analyse des Werkstoffversagens vornehmen zu können, wird die Rissbildung und –ausbreitung während des Biegeprozesses mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichnet. Abbildung 19 zeigt die am Lehrstuhl für Umformtechnik konzipierte Prüfanlage.

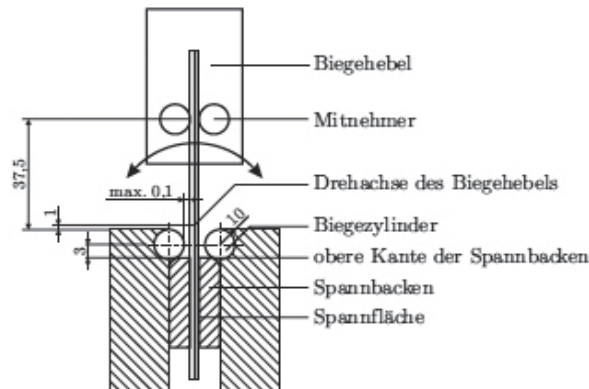


Abbildung 18: Skizze der Hin- und Herbiegeversuchsanlage am Lehrstuhl für Umformtechnik [9,50]

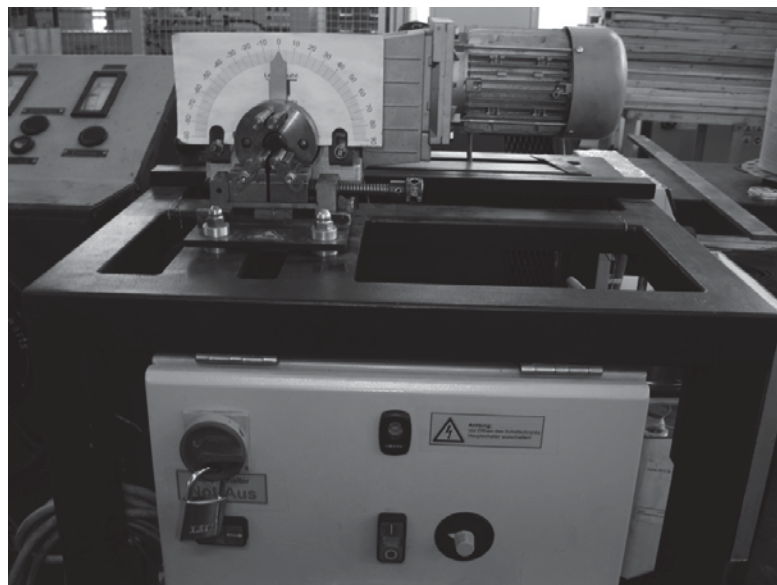


Abbildung 19: Versuchsanlage am Lehrstuhl für Umformtechnik [50]

### 3.5.7 Schälversuche

Eine weitere Analyse der Verbundgüte kann mittels einer speziell angefertigten Prüfeinrichtung über die Universalprüfmaschine der Firma Zwick realisiert werden. Dabei erfolgt die Einspannung der Proben in die Prüfvorrichtung entsprechend Abbildung 20. Die Bodenplatte (a) wird auf der Universalprüfmaschine fixiert. Der Aluminiumteil des Verbundes (b) wird über eine drehbar gelagerte Rolle (d) in vertikaler Richtung gezogen. Der Dorn (e) sorgt für eine Aufspaltung des gegebenen Verbundes. Auf den Magnesiumblech (c) der Plattierung wirken dabei keine Umformkräfte, wodurch die Raumtemperatursprödigkeit des Magnesiumwerkstoffes bei diesem Testverfahren keinen Einfluss auf das Ergebnis hat. Um das Einspannen zu erleichtern, werden schon während der Plattierpaketherstellung einige Zentimeter der Plattierpaarung durch Aufbringen von Graphitspray am Verschweißen gehindert. Diese Ausparung ermöglicht eine einfache Einspannung und einen reibungslose Durchführung des Tests. Abbildung 21 stellt den Schälversuch im Querschnitt dar. Bei der Durchführung des Versuches ist vor allem auf eine ausreichende Schmierung des Systems zu achten, damit keine zu hohen Zugwerte gemessen werden. Außerdem muss sich die Aluminiumschicht gleichmäßig von der Magnesiumschicht abtrennen, da es ansonsten zu verfälschten Messergebnissen kommen kann. Der Schälversuch liefert gute Vergleichswerte zur Charakterisierung der Haftfestigkeit des Verbundes und ermöglicht einen qualitativen Vergleich der unterschiedlichen Plattierchargen. [50]

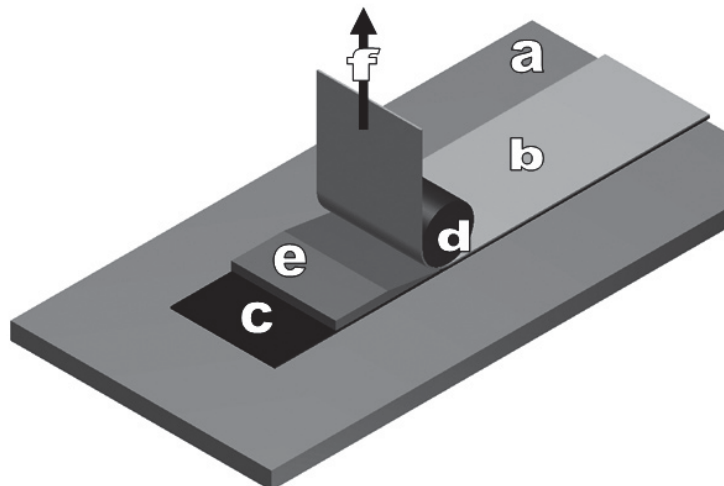


Abbildung 20: Einspannung beim Schälversuch (a) Grundplatte (aufgeschraubt auf ZWICK-Versuchsanlage) (b) Aluminiumblech (c) Magnesiumblech (d) drehbar gelagerte Walze (e) Dorn zum Auftrennen des Verbundes (f) Angriffspunkt der Zugkraft [50]

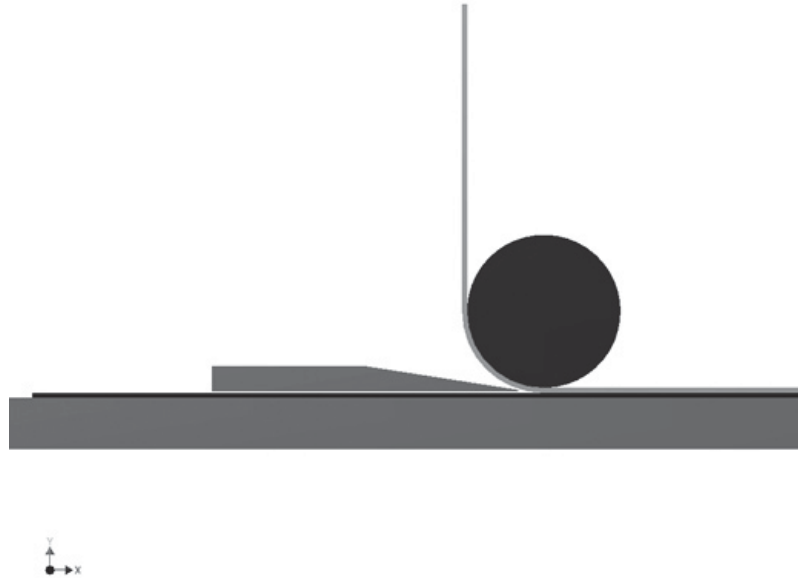


Abbildung 21: Querschnitt des Schälversuches [50]

### 3.5.8 Zugversuche mit ARAMIS

Aufgrund des geringen Umformvermögens des Magnesiumgrundwerkstoffs sind bei Zugversuchen nur niedrige Dehnwerte zu erwarten. Trotz dieser Einschränkung können aus dem herkömmlichen Zugversuch bei RT (Probengeometrie siehe Abbildung 22) wichtige Informationen über das Verformungsvermögen des Werkstoffverbundes gewonnen werden. Für die Verformungsmessung kommt das stereooptische ARAMIS-5M-System der Firma GOM zum Einsatz. Dieses Messmodul kann dreidimensionale Deformationen berührungslos aufzeichnen. Dabei wird ausgehend vom kräftefreien Zustand der Probe die Deformation der Materialoberfläche detektiert. Dazu dienen auf die homogene Oberfläche aufgebrachte stochastische Sprühmuster, deren lokale Veränderung während des Umformprozesses detektiert werden. Die Messung der Dehnungs- bzw. Verschiebungswerte wird von ARAMIS über die beobachteten Facetten ermöglicht. Diese bestehen aus 15 x 15 Pixelfacetten, die wiederum auf Grund unterschiedlicher Graustufen voneinander unterschieden werden können. Zur Durchführung der Berechnungen werden dabei den einzelnen Pixel lokale Koordinaten zugewiesen. [23]

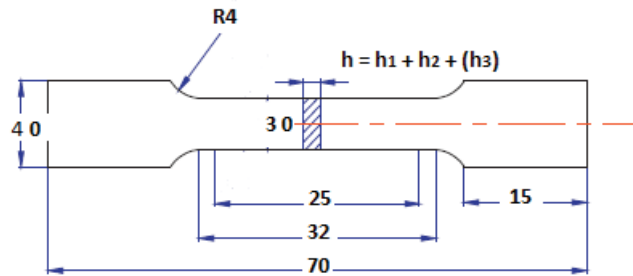


Abbildung 22: Probengeometrie für Zugversuche (Angaben in mm),  
h setzt sich aus den Dicken der einzelnen Bleche zusammen

### 3.6 Umformversuche

Die Umformbarkeit eines Materialverbundes stellt seine wichtigste Eigenschaft für die spätere großindustrielle Einsetzbarkeit dar. Wegen des geringen Umformvermögens des Grundwerkstoffs Magnesium kann eine optimale Halbzeug-Herstellung nur bei erhöhten Temperaturen von Statten gehen. Um die Einflüsse der unterschiedlichen Verformungsparameter (z. B. Umformgeschwindigkeit, Umformtemperatur) quantifizieren zu können, wurden am Lehrstuhl für Umformtechnik verschiedene Testverfahren (z. B. Näpfchentest) konzipiert und umgesetzt.

#### 3.6.1 Tiefungsversuche bei erhöhten Temperaturen („Näpfchentest“)

Um das Tiefziehpotential des zuvor optimierten Werkstoffverbundes analysieren zu können, wurde am Lehrstuhl für Umformtechnik eine Vorrichtung konzipiert, die eine Tiefung bei erhöhten Temperaturen ermöglicht. Angelehnt an den Tiefungsversuch nach Erichsen und verschiedener andere Näpfchenziehverfahren [20,21] wurde die in Abbildung 23 schematisch dargestellte Vorrichtung in einem Umluftofen aufgeheizt und anschließend in einer Druckprüfmaschine (siehe Abbildung 24) fixiert. Die dafür eingesetzte CE-zertifizierte Druckprüfmaschine DPM500 ist ein Prototyp zur Bestimmung der Druckfestigkeit unterschiedlichster Materialien und wurde am Lehrstuhl für Umformtechnik gefertigt. [58]



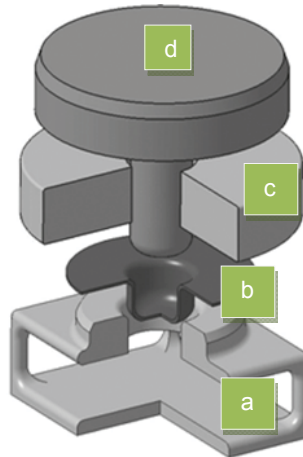


Abbildung 23: Tiefungsvorrichtung (Ofenaufheizung und anschließend in Pressvorrichtung eingespannt) (a) Fundament aus Stahl mit aufgeschweißtem Führungsring (b) Nöpfchen (c) Niederhalterring (d) Pressstempel

Die Probenfertigung erfolgt zuvor mit der Stanzvorrichtung der Blechuniversalprüfmaschine am Lehrstuhl für Umformtechnik. Anschließend ist eine gründliche Beaufschlagung der Scheiben mit Schmiermittelpaste unumgänglich. Einige der Proben werden zusätzlich mit Typ-K-Thermoelementen versehen, um die Temperaturführung überwachen zu können. Der ausgeprägte Stahlkörper der im gesamten aufgeheizten Versuchsvorrichtung verhindert aber eine zu schnelle Auskühlung der Proben während dem Wechsel zwischen Umluftofen und Pressvorrichtung.

Anhand der gewonnenen Proben (im Folgenden als Nöpfchen bezeichnet) und der aufgezeichneten Kraft-Weg-Verläufe kann die optimale Umformtemperatur und –geschwindigkeit beim Tiefziehen ermittelt werden. Bei der gegebenen Geometrie der Prüfvorrichtung und der eingesetzten Proben ( $\varnothing = 50 \text{ mm}$ ) konnte kein Nachfließen des Werkstoffes in den Ziehbereich des Nöpfchens erzielt werden, die gewonnenen Ergebnisse entsprechen also nicht denen der herkömmlichen Tiefziehversuche [20]. Trotz dieser Widrigkeit können anhand der maximalen Tiefung vor dem Versagen des Werkstoffverbundes interessante Aussagen über das Umformverhalten des Verbundwerkstoffs getroffen werden.



Abbildung 24: Druckprüfmaschine am Lehrstuhl für Umformtechnik

### 3.6.2 Thermomechanische Eigenschaften – Analyse anhand des Gleeble3800-Prüfsystems

Jeder Magnesiumwerkstoff benötigt auf Grund seines hexagonalen Kristallgitters erhöhte Temperaturen, um eine plastische Verformung durchführen zu können. Literaturquellen bieten dabei unterschiedliche optimale Umformtemperaturen. Generell wird von  $498\text{ K} (T_M * 0,4)$  als Grenzwert für die plastische Formgebung angeführt, wobei etwaige Legierungselemente den Temperaturwert nach oben hin verschieben [30]. Ausgehend von den Werten aus der Vorversuchs- und Hauptversuchsreihe wird für die Messungen in dieser Arbeit eine Temperatur von  $623\text{ K}$  beaufschlagt und eine Helium-Atmosphäre gewählt. Die Erwärmung der Probe erfolgt dabei konduktiv mittels speziell für Blechwerkstoffe angefertigter Kupferbacken. Die Messung der Temperaturverteilung am Werkstück gelingt mittels aufgeschweißten Typ-K-Thermoelementen. [51] Dabei werden mittels Laser-Dilatometer-System die Längenänderung und/oder die Querdehnung gemessen. Die Auswertung erfolgt mit einer speziellen Grafik-Analyse-Software. [58]

Die Probenfertigung (Geometrieangabe siehe Abbildung 22) erfolgt mittels Wasserstrahl-schneidanlage und anschließender gründlicher Reinigung der Prüflinge. Die Oberflächen der Proben müssen dabei vollständig von sämtlichen Graphitsprayrückständen befreit werden, da sonst die Thermoelemente nicht erfolgreich angeschweißt werden können. Trotz gründlicher Reinigung ist die Haftung der Thermoelemente auf der Magnesiumseite des Walzverbundes sehr gering. Daher werden die Schweißstellen vorwiegend auf der Aluminiumseite des Verbundes angebracht.



Abbildung 25: (a) Gleeble3800-Prüfsystem, (b) Kupferbacken mit stark erhitzter Probe (nicht aus dieser Arbeit) [58]

### 3.6.3 Härteverläufe

Um den etwaigen Einfluss von intermetallischen Phasen in der Verbindungszone feststellen zu können, bieten sich die Microhärteprüfung nach Vickers (Mikro-Härte-Prüfgerät der Marke EMCO) an. Die Proben werden dabei für 15 Sekunden mit 100 g beaufschlagt. Die Härteindrücke erfolgt dabei normal zur Walzrichtung an drei Punkten (im Mg-Grundwerkstoff, in der Verbundzone und im Al-Grundwerkstoff).

### 3.6.4 Aufnahmen mit dem Raster-Elektronen-Mikroskop

Die Aufnahmen anhand eines Raster-Elektronen-Mikroskops (siehe Abbildung 26) ermöglichen es, die Grenzschicht mit sehr hoher Auflösung zu betrachten. Anschließende EDX-Analysen gewährleisten eine Bestimmung der Elementverteilung und somit eine Charakterisierung der Grenzschicht.



Abbildung 26: REM am Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie

## 4. Ergebnisse und Diskussion

Die folgende Ergebnisdiskussion ist wie der Versuchsblock in drei Teilgebiete aufgesplittert.

### 4.1 Ergebnisse aus der Vorversuchsreihe

Im Zuge der Vorversuchsreihe zeigt sich, dass der Plattiererfolg wesentlich mit den Faktoren Temperatur und Walzkraft (Stichabnahme) korreliert. Generell gilt, dass wenn die Umformtemperatur während des Plattiervorgangs unter 225 °C, also unter jene Temperatur bei der die pyramidalen Gleitebenen aktiviert werden, sinkt, sich der Magnesiumwerkstoff nicht mehr duktil verformen lässt. [30] Im Praxistest zeigt sich, dass auch über 250 °C noch vereinzelte Risse an den Rändern der Plattierschichten auftreten können (siehe Abbildung 16). Erst ab einer Umformtemperatur von > 300 °C zeigen Vorversuche eine fehlerfreie Verbundherstellung. Bei Temperaturen über 450 °C und entsprechend hohen Umformkräften kommt es teilweise zur Aufschmelzung des Magnesiumwerkstoffs, wodurch die Plattierung ebenfalls versagt und das geschmolzene Magnesium aus dem Verbundsandwich herausfließt. Für die eigentliche Werkstoffoptimierung in der Hauptversuchreihe gilt also ein Temperaturbereich von 300-400 °C, diese Werte decken sich mit den Angaben aus den unterschiedlichen Literaturquellen [66,68,69].

Weiters zeigt sich im Zuge der Vorversuche eine starke Abhängigkeit der Verbundqualität von der Stichabnahme. Wird der Werkstoff mit zu geringen Kräften gewalzt und keine ausreichende Stichabnahme erzielt, kann die Energiebarriere nicht überschritten werden. Es kommt zu keiner ausreichenden Längung der beiden Grundmaterialien und somit nicht zu einer ausreichenden Freilegung von jungfräulichen (oxidfreien) Oberflächen. Wird zu wenig reines Metall zwischen den Oxidinseln extrudiert, können keine Mischkristalle oder intermetallischen Phasen ausgebildet werden und somit kann keine ausreichende Bindefestigkeit zwischen den Al- und Mg-Bleichen entstehen. [4-7,9]

Die der Vorversuchreihe zugeordneten Prüfverfahren (e. g. Falt-, Aufkeilversuche) bringen keine quantitativen Aussagen in Bezug auf die Werkstoffqualität. Sie ermöglichen es lediglich eine schnelle und effektive Zwischenprüfung während des Herstellungsprozesses durchzuführen und so eventuelle Änderungen am Produktionsweg sofort umzusetzen.

Die Ergebnisse der Vorversuchsreihen geben die Temperatur- und Stichabnahmengrenzen wieder. Die dazugehörigen Werte sind aus Tabelle 5 zu entnehmen.

Tabelle 5: Parameterschranken ermittelt aus der Vorversuchsreihe

Parameter	Minimalwert	Maximalwert
Temperatur [°C]	300	450
Stichabnahme [%]	ca. 50	(> 80 %) von max. Walzkraft der Anlage abhängig

Folgende weitere Ergebnisse konnten aus der Vorversuchsreihe gewonnen werden:

- Die Temperatur während des Umformprozesses muss so gut wie möglich konstant gehalten werden, um einen gleichmäßigen Verbund gewährleisten zu können. Dies wird über die Stahlpakete zur Wärmespeicherung gewährleistet.
- Die Walzen müssen während des Umformprozesses einen ausreichenden Schmierfilm aufweisen, da es sonst zu Unebenheiten in der Oberflächengeometrie oder zum totalen „Auftrennen“ des Plattierpaketes kommt.
- Die Blechpakete dürfen nicht zu lange im Vorwärmofen verweilen, da von einer Grobkornbildung im Bereich des Magnesiums auszugehen ist ( $T > 0,4 \cdot T_M$ ). Dazu mehr in der Ergebnisanalyse des Hauptversuchsteils.
- Die Walzpakete müssen ausreichend oft punktgeschweißt sein, da es sonst zu einer Ausfächerung während des Walzprozesses kommen kann. Ist das Magnesiumblech nicht ausreichend verankert, kann es aus dem Verbund herausgedrückt werden, und somit wird jegliche Plattierung unmöglich.
- Die Walzpakete müssen „angespitzt“ werden um die Greifbedingung beim Walzen erfüllen zu können.
- Als „Anti-Plattierschutz“ zwischen der Stahlmantelung und dem tatsächlichen Verbundwerkstoff eignet sich schwarzer Graphit. Weißer Graphit (Bornitrid) wird normalerweise erst bei wesentlich höheren Temperaturen als Schmierstoff eingesetzt.

## 4.2 Ergebnisse der Hauptversuchsreihe

Mit den gegebenen Intervallen für Temperatur und Stichabnahme aus den Vorversuchsreihen (siehe Tabelle 5) kann die Optimierung des Werkstoffverbundes durchgeführt werden. Dazu erfolgt die Aufstellung einer Versuchsmatrix, deren Ergebnisse Aufschlüsse über die optimalen Versuchsbedingungen geben.

Die zur Optimierung herangezogenen Parameter sind:

- Vorwärmtemperatur und Ofenhaltezeit
- Umformtemperatur
- Stichabnahme (korreliert mit Walzkraft)

- Oberflächenvorbehandlung (mit/ohne Bürsten der Oberfläche)

Zur Bewertung ausgewählte Ergebnisse sind:

- Anzahl der möglichen Biegungen (Hin- und Herbiegeversuch)
- Haftfestigkeit (Abschälversuch)
- Gleichmäßigkeit und Rissfreiheit in der Verbindungszone (LIMI und ALICONA)
- Korngefüge (LIMI)

#### 4.2.1 Auswertung der Temperaturverläufe

Die direkte Temperaturmessung während des Walzprozesses ist prinzipiell über das Anbringen von Typ-K-Thermoelementen möglich. Die Thermoelementdrähte werden dabei mittels Punktschweißung zwischen den Blechpaketen (genauer: zwischen den Mg- und Al-Blechen) fixiert. In Abbildung 27 und Abbildung 28 sind die Temperaturverläufe von zwei Typ-K-Thermoelementen während desselben Walzprozesses abgebildet. Der Temperaturverlauf aus Abbildung 27 ist dem mit dem Mg-Blech verschweißten Thermoelement zuzuordnen. Nach ca. 5 Sekunden (Abbildung 27 a) zeigt sich ein kurzer Abfall der Temperatur, der wahrscheinlich durch den Wärmeaustausch mit den kalten Walzen zu Stande kommt. Durch die aufgebrauchten Umformkräfte kommt es zu einem erneuten Wärmeeintrag. Bei Abbildung 27 (b) kommt es wahrscheinlich zum Ablösen des Thermoelements durch die eingebrachten Walzkräfte. Der erneute Temperaturanstieg könnte einen Hinweis auf ein „Niederdrücken“ der Kontaktstelle des Thermoelements auf das Metall darstellen. Nach dem Ende des Walzprozesses fällt das Thermoelement regelrecht aus der Verbindungszone heraus und die Messwerte gehen sofort auf Raumtemperatur zurück.

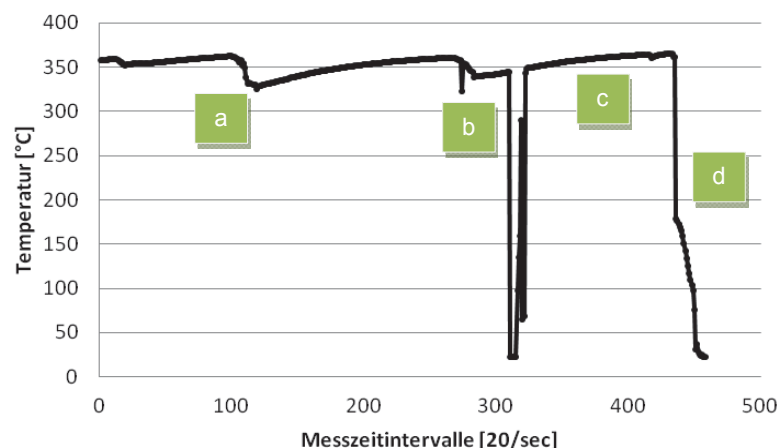


Abbildung 27: Temperaturverlauf während des Walzprozesses (a) Kontakt mit Walze (b) Ablösen des Kontaktes (c) erneutes Anpressen durch Walzkraft (d) endgültiges Ablösen des Thermoelementes

In Abbildung 28 schlägt sich das Ablösen des Thermoelementes nicht so deutlich auf die Temperaturführung nieder. Hierbei handelt es sich um ein auf Aluminium aufgeschweißtes Thermoelement. Diese zeigen generell eine bessere Anhaftung als gleiche Thermoelemente die mit Magnesium verschweißt werden.

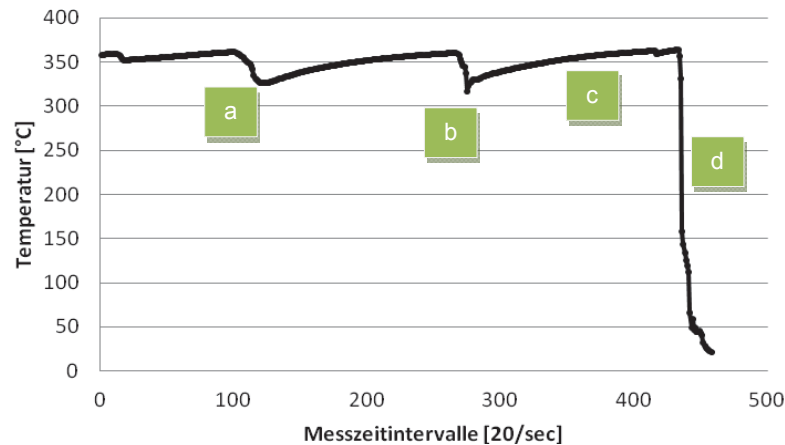


Abbildung 28: Temperaturverlauf während des Walzprozesses (a) Kontakt mit Walze (b) Ablösen des Kontaktes (c) erneutes Anpressen durch Walzkraft (d) endgültiges Ablösen des Thermoelementes

Die Temperaturwerte aus Abbildung 27 und Abbildung 28 sind mit Vorbehalt zu betrachten, da es sich bei den oben angeführten Punkten lediglich um Vermutungen handelt. Durch die hohe Verformungsgeschwindigkeit des Walzprozesses bleibt keine Zeit um den genauen „Ablösezeitpunkt“ der Thermoelemente zu beobachten. Klar ist lediglich, dass diese nach jedem Versuch aus dem Verbund herausgezogen werden. Die Versuche belegen jedoch, dass die angewendete Stahlmantelung ihren Zweck, die Speicherung der zugeführten Wärmeenergie während des Walzprozesses, erfüllt.

#### 4.2.2 Hin- und Herbiegeversuche

Zielsetzung der Hin- und Herbiegeversuche ist es, den Einfluss der Stichabnahme und der Oberflächenvorbehandlung auf das Plattierergebnis zu beschreiben. Weiters kann der Einfluss von Dicke und Anzahl der Aluminiumschichten auf das Umformverhalten bei Raumtemperatur analysiert werden. Dabei kommt es nur selten zum Versagen der Verbundschicht. Vielmehr liegt die Wahrscheinlichkeit, dass die Magnesiumgrundsicht spröde bricht, sehr hoch. Diese Thematik wird in Abbildung 29 sehr gut verdeutlicht.

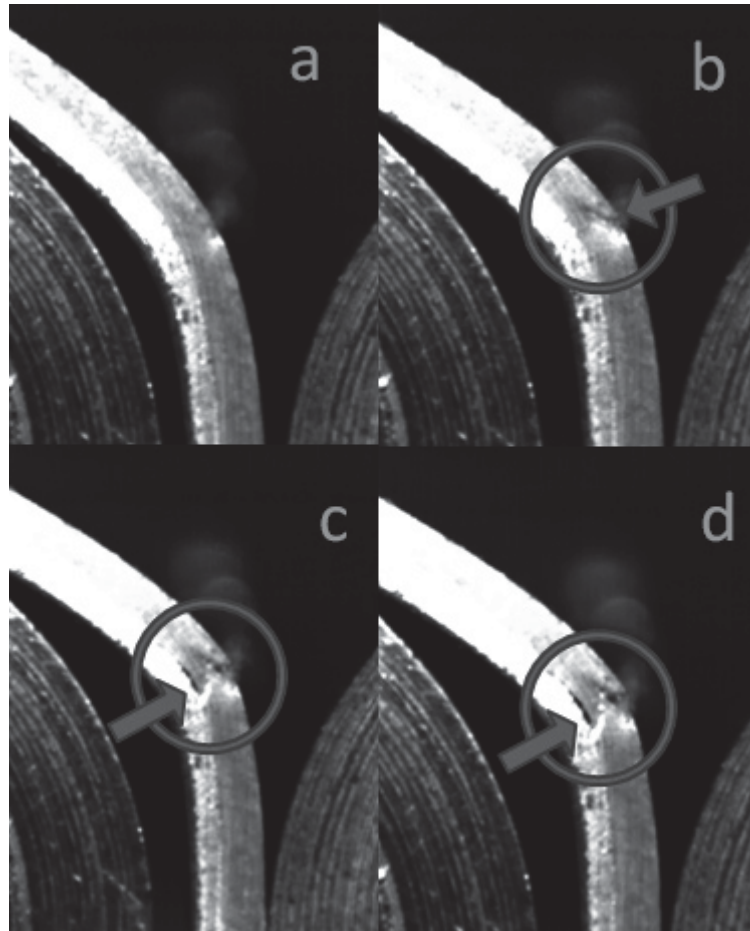


Abbildung 29: Hochgeschwindigkeitskameraaufnahme während Hin- und Herbiegeversuch, (a) Rissinitialisierung an der Außenseite des Magnesiumwerkstoffs (b) Riss breitet sich ins Innere fort (c) Geringfügiges Ablösen der Magnesiumschicht von dem Aluminiumblech (d) Riss wird ausgeweitet, Werkstoffverbund versagt

Das aufplattierte Aluminium bringt eine Art Stützkraft auf, was in einer erhöhten Biegefestigkeit des Werkstoffs resultiert. Versuche zeigen, dass das „reine“ AZ31-Blech maximal 2 Biegungen erträgt, während der Verbundwerkstoff wesentlich höhere Biegezahlen bewerkstelligt (bis zu 29 Biegeschritte bei gleichen finalen Probendicken). Abbildung 30 zeigt, dass Al-Mg-Al-Verbunde (0,5–2–0,5 mm Ausgangsdicke) die größten Biegezahlen ertragen, da zwei Al-Layer positive Stützwirkung auf das Mg-Blech aufbringen. Bei einseitig plattierten Verbunden (Al-Mg-Verbunde) ist eine Abhängigkeit der Biegezahl von der Dicke des aufgetragenen Aluminiumbleches zu erkennen.



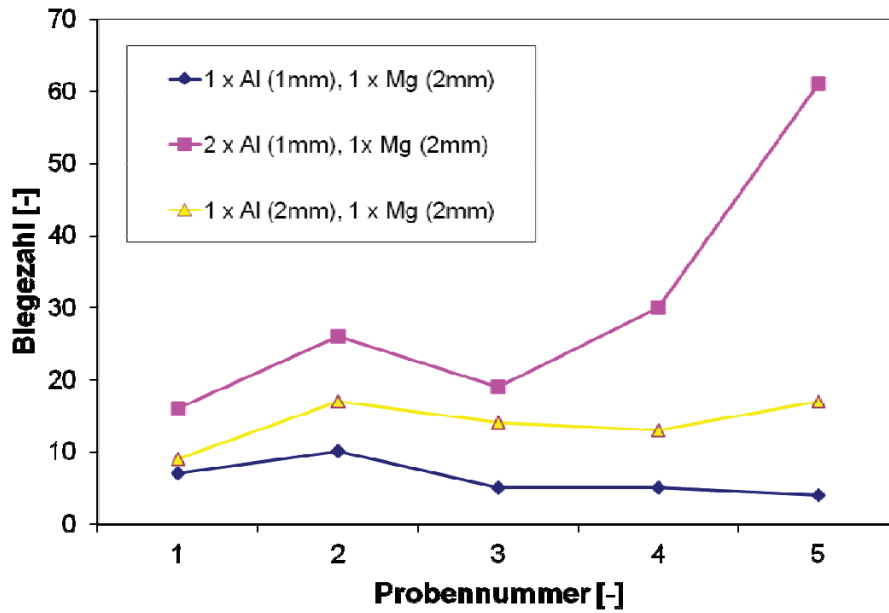


Abbildung 30: Ertragene Biegezahlen in Korrelation zur Plattierfolge

Abbildung 31 zeigt, dass ein Versagen in der Verbindungszone schon bei sehr geringen Umformgraden eintritt, also keine ausreichende Grenzschicht zwischen den Plattierpartnern ausgebildet werden kann. Sehr hohe Biegezahlen liefern Verbunde, die bei 350 °C und einer Stichabnahme von 70 % gewalzt werden.

Die Oberflächenbehandlung durch Bürsten zeigt keinen signifikanten Einfluss auf die Qualität der Werkstoffverbunde. Es kann davon ausgegangen werden, dass während der Vorwärmzeit der Blechpakete bereits wieder eine vollständige, dichte Oxidschicht ausgebildet wird und somit dieser positive Effekt des Bürstens entfällt. Weiters ist die Oxidschicht des Magnesiumwerkstoffs durch ihr geringeres Volumen als der Grundwerkstoff [30] ohnehin sehr anfällig für das Aufplatzen während des Walzprozesses, dadurch bringt die Kaltverfestigung durch das Bürsten in diesem Zusammenhang ebenfalls keinen nennenswerten Vorteil. Der dritte Einfluss des Bürstens, eine Erhöhung der Oberflächenrauigkeit, weist offensichtlich einen zu geringen Einfluss auf den Plattierungserfolg auf und kann mit den gegebenen Analysemethoden nicht dargestellt werden.

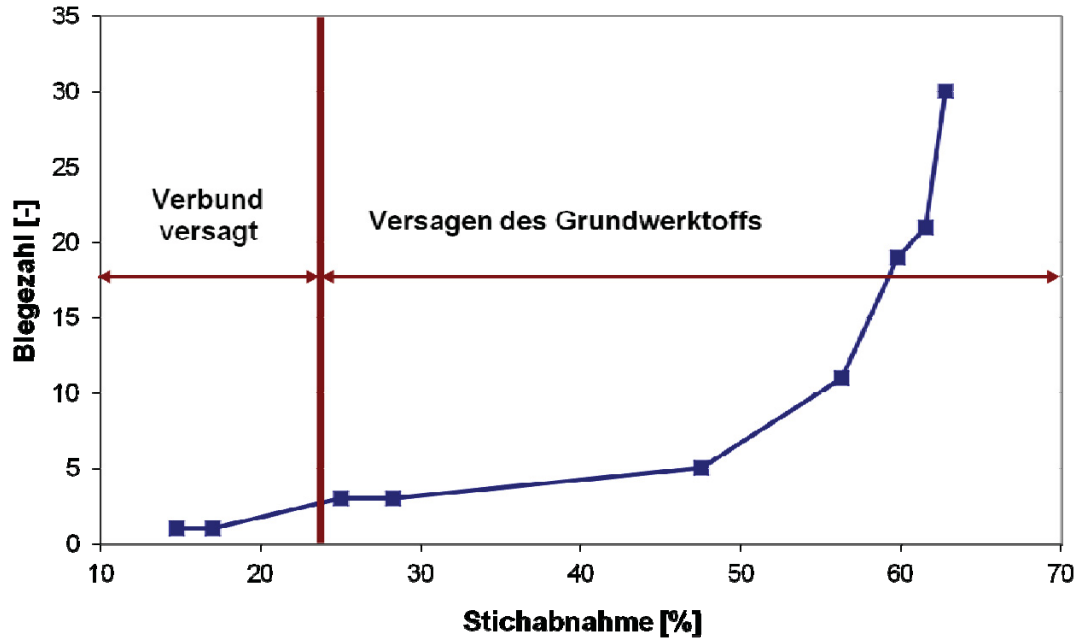


Abbildung 31: Ertragene Biegezahlen über der prozentuellen Stichabnahme

#### 4.2.3 Schälversuche

Die Ergebnisse aus den Schälversuchen bieten effizientere Informationen in Bezug auf die Haftfestigkeit des Werkstoffverbunds, als die Hin- und Herbiegeversuche, da hier das Versagen des Magnesiumgrundwerkstoffs ausgeschlossen wird. Wie erwartet, zeigt sich eine Steigerung der Haftfestigkeit bei erhöhten Walztemperaturen und größeren Umformgraden (siehe Abbildung 32 und Abbildung 33). Die Oberflächenvorbehandlung zeigt wiederum keinen nennenswerten Einfluss auf die Ergebnisse.

Bei der Auswertung der Schälversuche muss darauf geachtet werden, dass nur perfekt abgelöste Proben in die Analyse aufgenommen werden. Bei einigen Zugversuchen kann es zu nur zu einer teilweisen Ablösung des Aluminiums kommen, wodurch die Ergebnisse total verfälscht werden. Weiters darf es zu keiner Verkeilung oder Verspannung des Führungsbleches kommen, da sonst die Kraftwerte nach oben schnellen.

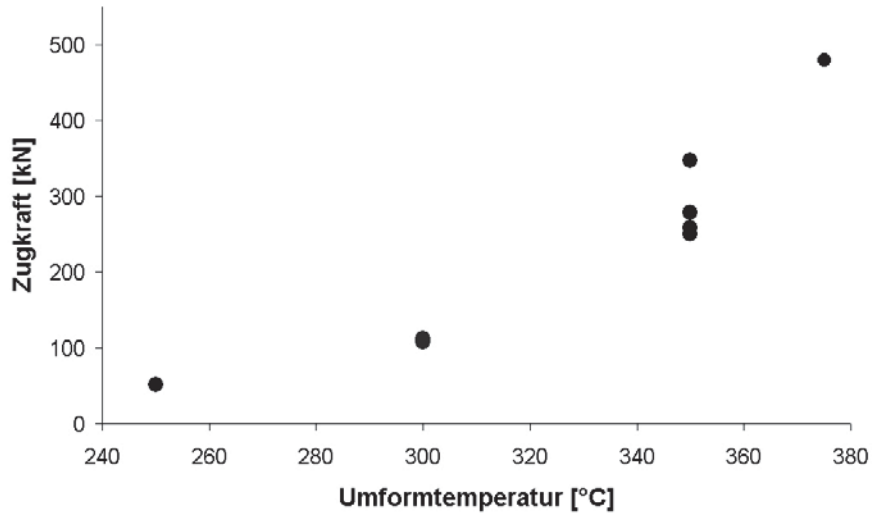


Abbildung 32: Aufzubringende Zugkraft zum Ablösen des Aluminiumblechs vom Magnesiumgrundblech – über die bei der Umformung vorherrschende Temperatur

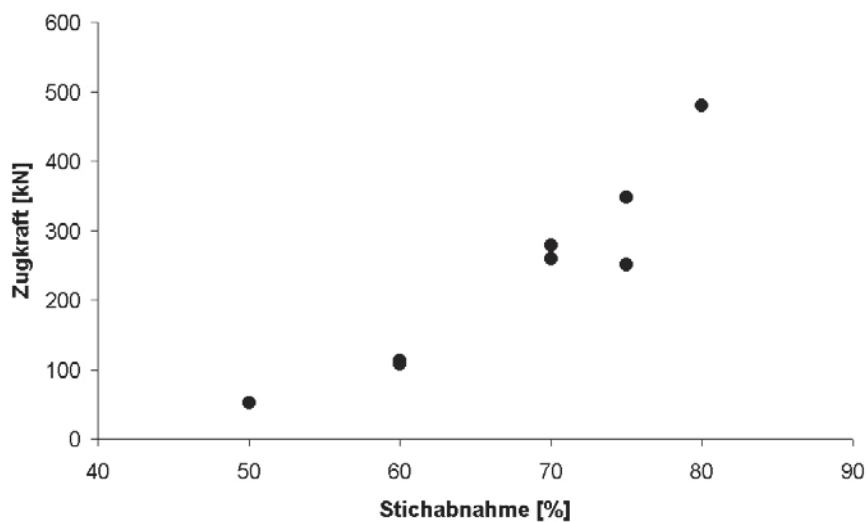


Abbildung 33: Aufzubringende Zugkraft zum Ablösen der Aluminiumbleche von den Magnesiumgrundblechen – aufgetragen über die während des Walzplattierens durchgeführte Stichabnahme

#### 4.2.4 Lichtmikroskopische Untersuchungen

Bei den lichtmikroskopischen Untersuchungen kann eine makroskopisch-betrachtete fehlerfreie Gernzschicht auf mikroskopische Risse und Ablöseerscheinungen hin untersucht werden. Bei den nach den Grenzwerten der Vorversuchsreihe hergestellten Verbunden sind keine dieser Effekte zu beobachten. Verbunde, die bei makroskopischer Betrachtung als „schlecht“ eingestuft werden (also schon außerhalb der Vorversuchsergebnisse liegen), zerfallen während der metallographischen Präparatirion und können nicht befriedigend analysiert werden. Durch den unterschiedlichen Ätzangriff kommt es zu der zusätzlichen

Problematik einer unscharfen Grenzschicht. Dies kann durch eine 3D-Aufnahme umgangen werden (siehe Abbildung 34).

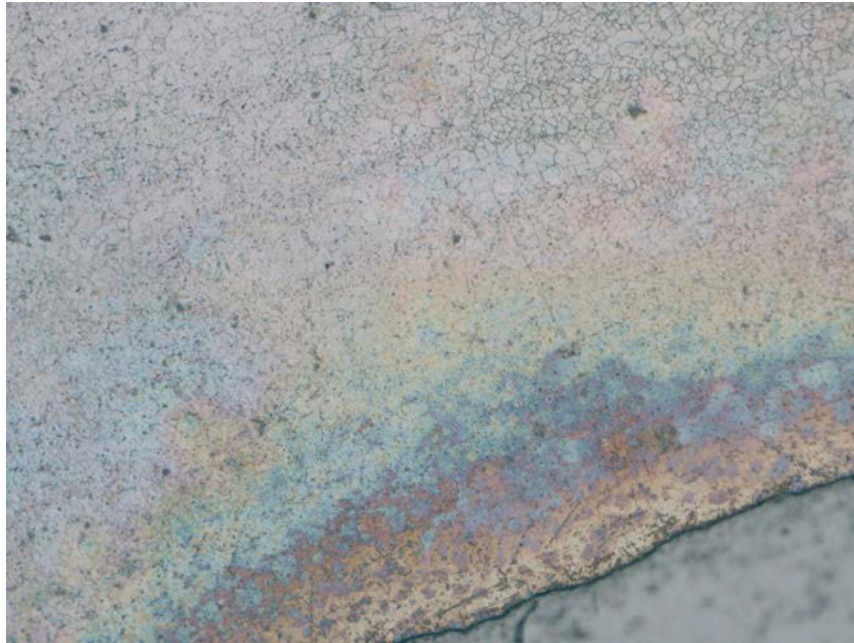


Abbildung 34: Geätzter Plattierquerschnitt mit schlecht aufgelöster Verbindungszone

#### 4.2.5 Konvokalmikroskopie

Die Konvokalmikroskopie liefert eine 3D-Aufnahme der Grenzschicht und zeigt die deutliche Abstufung zwischen den beiden Blecharten (siehe Abbildung 35). Vor allem in der Falschfarbendarstellung (Abbildung 35 b) ist diese Stufenbildung gut zu erkennen. Die Übergangszone zeigt anhand ihrer graduellen Abstufung einen kontinuierlichen Übergang zwischen den zwei Hauptkomponenten Magnesium und Aluminium (dieser Verlauf kann mittels REM-Aufnahmen bestätigt werden). Bei keinen der im Hauptversuchsteil der Arbeit hergestellten und mittels LIM1 und ALICONA analysierten Proben konnten Risse oder Delaminationen festgestellt werden.

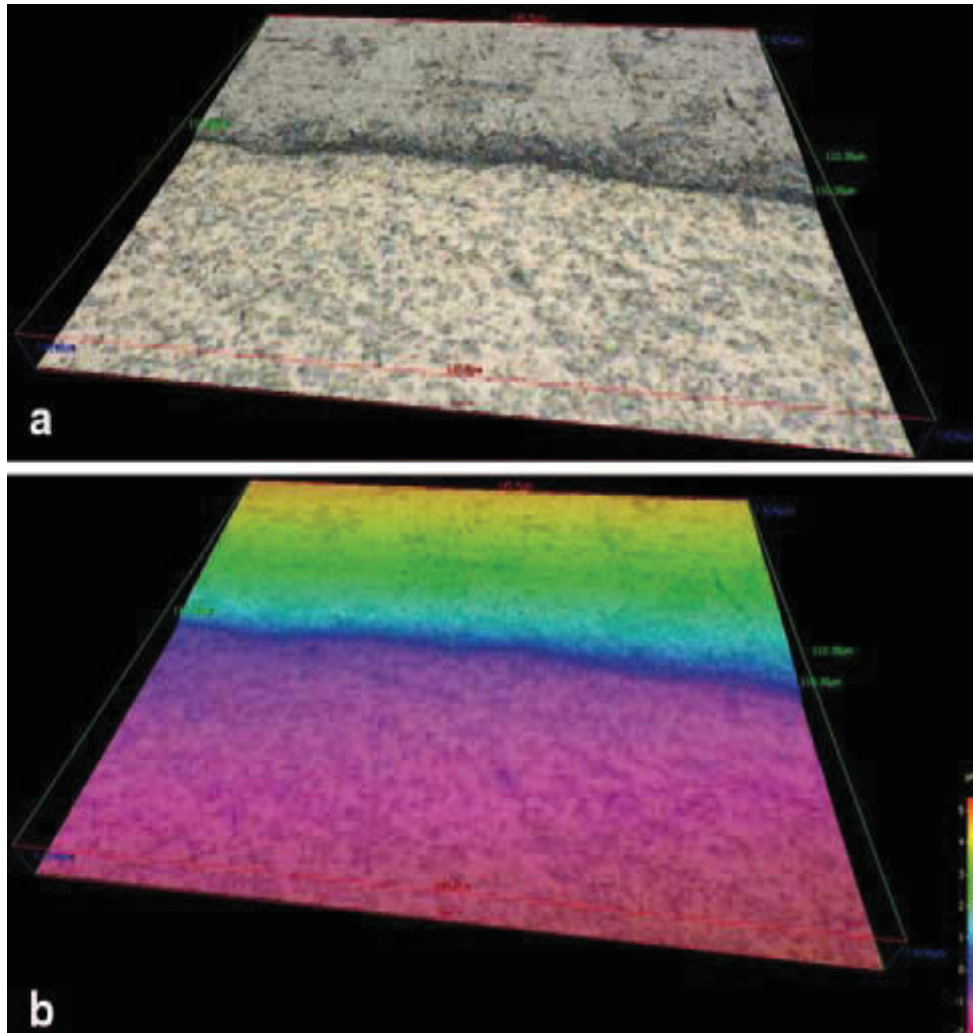


Abbildung 35: 3D-Aufnahme der Verbindungszone zwischen den Blechen (a) in Echtfarben (b) in Falschfarben aufgelöst nach der Höhenverteilung in  $\mu\text{m}$

### 4.3 Versuche zur Warmumformbarkeit des Materialverbundes

Wie schon zuvor erwähnt, ist eine Umformung des optimierten Verbundes nur bei erhöhten Temperaturen möglich. Wird der Verbund allerdings zulange erhöhten Temperaturen ausgesetzt, kann es einerseits zu negativen Gefügeveränderungen und andererseits zur Ausbildung von spröden intermetallischen Phasen kommen. Zielsetzung im Folgenden ist eine genaue Festlegung des Prozessfensters für die Warmumformung des optimierten Werkstoffverbundes.

#### 4.3.1 Thermomechanische Analyse mittels Gleeble-System

Die Gleeble-Zugprüfung erfolgt nach den zuvor genannten Umformkriterien des Grundwerkstoffs Magnesium bei  $350\text{ °C}$  und unter einer Helium-Atmosphäre. Die Erwärmung der Probe erfolgt dabei konduktiv und dauert in der Regel wenige Sekunden. Zur Messung der Wärmeverteilung werden Typ-K-Thermoelemente auf die Aluminiumbleche aufgeschweißt. Die er-

mittelte Fließspannung des Werkstoffverbundes unter gegebenen Bedingungen beträgt im Mittel 25 MPa. Dieser Wert deckt sich mit entsprechenden Angaben aus verschiedenen Literaturquellen [68,69]. Die ermittelten Kurven (siehe Anhang) bieten die Grundlage für eine eventuell nachgeschaltete Umformsimulation (z. B. mit Deform2D). Zusätzlich kann mittels lichtmikroskopischen und rasterelektronischen Untersuchungen nachgewiesen werden, dass sich durch die kurze Wärmeeinwirkung während der Gleeble-Versuche kein Grobkorngefüge und keine starke Interdiffusion negativ auf den Werkstoffverbund auswirken kann.

#### 4.3.2 Näpfchentests

An dieser Stelle soll noch einmal darauf verwiesen werden, dass bei der gegebenen Geometrie der Tiefziehvorrichtung kein Nachfließen des Verbundwerkstoffs möglich ist und somit die Ergebnisse nicht mit herkömmlichen Tiefungsversuchen verglichen werden können. In der nachfolgenden Versuchsmatrix wird zu Vergleichszwecken eine mittlere Näpfchentiefe (10 mm) ausgewählt und alle gemessenen Proben damit verglichen. Die Matrix (Tabelle 6) vergleicht verschiedene Vorwärmtemperaturen (entspricht in etwa der Umformtemperatur) mit verschiedenen Umformgeschwindigkeiten. Die Zahlen in der Matrix zeigen, wie viele Proben bei den gegebenen Bedingungen die oben angeführte Näpfchentiefe erreichen konnten, ohne dass Werkstoffversagen eingetreten ist.

Tabelle 6: Ergebnisse der Näpfchentests [51]

<b>Umform- geschwindigkeit</b> ↓	<b>Temperatur →</b>	<b>250 °C</b>	<b>300 °C</b>	<b>350 °C</b>
10 mm/s		1 von 3	3 von 3	2 von 3
5 mm/s		0 von 3	3 von 3	1 von 3

Abbildung 36 zeigt die charakteristische Versagensursache bei den praktizierten Näpfchentests. Alle Näpfchenproben reißen an der Negativkante des Pressstempels. Lichtmikroskopische Untersuchungen belegen, dass an dieser Stelle die größte Ausdünnung des Prüflings erfolgt.

Bei an die Anforderungen des Metallverbundes angepassten Prüfgeometrien würde der Werkstoff nicht ausdünnen, sondern aus dem Bereich des Niederhalters nachfließen. [3,21]

Um eine geeignete Vorrichtung für diese Zwecke zu realisieren, sind weitere Untersuchungen notwendig. Versuche an der Blechuniversalprüfmaschine, die nach einem ähnlichen

Prinzip funktioniert, gingen fehl, da es nicht möglich war, die Testvorrichtung auf die notwendigen Umformtemperaturen aufzuwärmen.



Abbildung 36: Näpfchenprüfling mit typischem Versagensprofil [51]

#### 4.3.3 Lichtmikroskopische Untersuchungen

Bei der Analyse der Warmumformbarkeit des Werkstoffverbundes haben die eventuellen Auswirkungen einer Wärmebehandlung auf den Werkstoff starken Einfluss. [22] Darüber kann eine lichtmikroskopische Untersuchung nach unterschiedlichen Wärmebehandlungsabläufen Aussagen liefern. Der Verbund wird dabei auf eventuelle Grobkornbildung untersucht. Die Magnesiumschicht zeigt sich hierbei als am empfindlichsten. In Abbildung 37 bis Abbildung 39 sind drei Korngefüge (AZ31) nach unterschiedlich langer Glühzeit (bei 350 °C) dargestellt. Es zeigen sich bereits nach 10 Minuten erste Kornvergrößerungen. Nach 20 Minuten liegt bereits ausgeprägtes instabiles Kornwachstum vor [22]. Als Richtwert für Kornwachstum kann die geschätzte Rekristallisationstemperatur mit  $T_M \cdot 0,4$  angenommen werden. [27] Mit 350 °C liegt man also deutlich über diesem Richtwert. Daher ist der Zeitfaktor in diesem Zusammenhang ausschlaggebend. Grobkorngefüge können negative Auswirkungen auf die mechanischen Kennwerte haben, da weniger Korngrenzen zum Versetzungsaufstau vorliegen. [22]



Abbildung 37: Korngefüge der AZ31-Legierung nach einer Glühzeit von 10 Minuten



Abbildung 38: Korngefüge der AZ31-Legierung nach einer Glühzeit von 15 Minuten

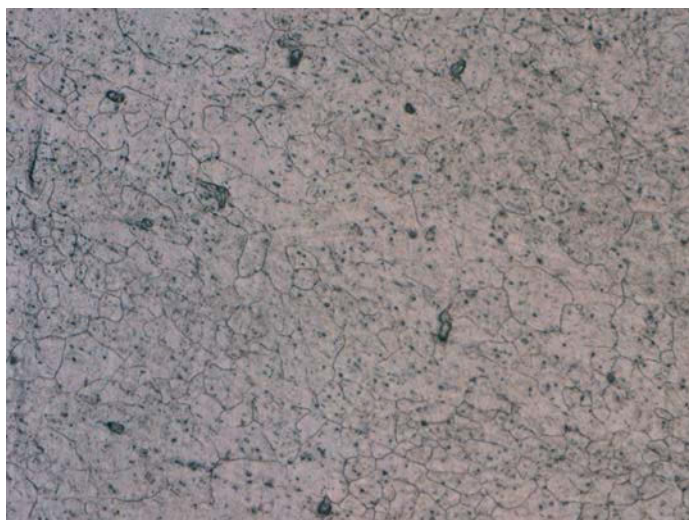


Abbildung 39: Korngefüge der AZ31-Legierung nach 20 minütiger Glühzeit



#### 4.3.4 Rasterelektronische Untersuchungen

Mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops konnten die Diffusionsvorgänge innerhalb des Werkstoffverbundes dargestellt werden. Dazu wurden gleiche Proben nach unterschiedlichen Wärmebehandlungen und Umformvorgängen untersucht. Abbildung 40 zeigt die unterschiedliche Ausprägung der Verbindungszonen. Die in Abbildung 40 sichtbaren Risse sind auf die Korrosion des Magnesiumwerkstoffs zurückzuführen, da die präparierten Proben nach dem Schleifen relativ lange herkömmlicher Luftatmosphäre ausgesetzt waren. Durch das geringere Volumen des Magnesiumoxids gegenüber dem Magnesiummetall kommt es zu Fehlpassungen, Zugspannungen und letztendlich zur Rissausbildung [30]. Ein weiterer Aspekt, der aus den Aufnahmen aber nicht klar herauszulesen ist, ist der Kirkendall-Effekt. Prinzipiell ist anzunehmen, dass die Magnesiumatome wesentlich schneller in die Aluminiummatrix diffundieren, als umgekehrt die Aluminiumatome in das Magnesiumgitter [54]. Daher kann es zu einer Verarmung an der dem Magnesium zugewandten Seite des Verbundes kommen. Resultat dieses Verarmungsvorganges wären herabgesetzte mechanische Kennwerte in Bezug auf das Umformvermögen des Werkstoffverbundes, wie es beispielsweise bei den länger geglühten Näpfchenversuchen der Fall war.

Abbildung 41 zeigt den Vergleich zwischen zwei unterschiedlich lange geglühten Proben. Im ersten Fall ist zwar eine Diffusion zu erkennen, diese kann aber noch als durchaus positiv bewertet werden, da hier eine Verbesserung der Bindeeigenschaften zu erwarten ist [2,9]. Im zweiten Fall zeigt sich bereits eine deutlich ausgeprägte Interdiffusionszone, dabei kann von der Ausbildung von spröden intermetallischen Phasen ausgegangen werden.

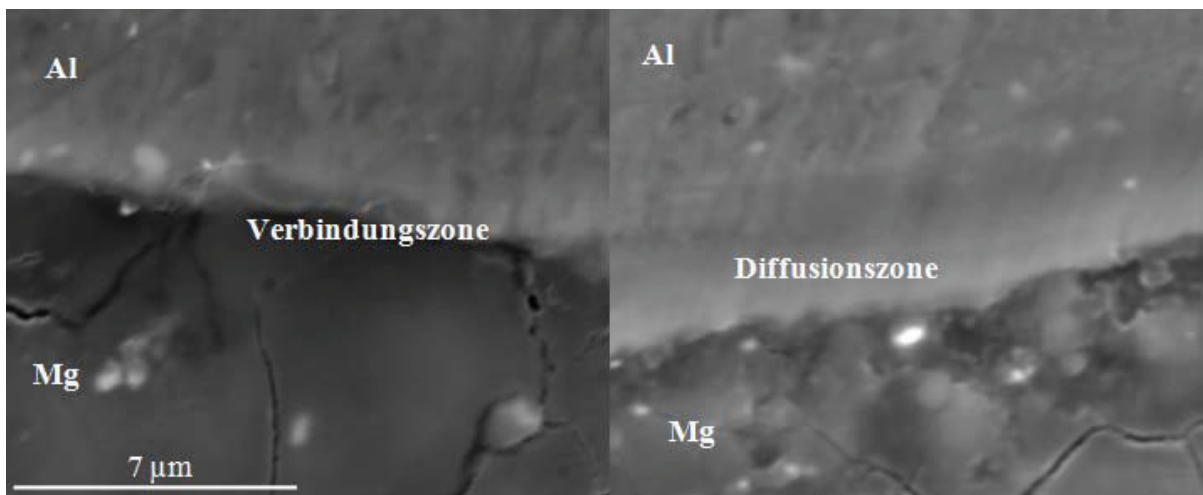


Abbildung 40: REM Aufnahmen der Verbindungszonen nach unterschiedlich langen Wärmebehandlungsprozessen (a) 10 Minuten bei 350 °C (b) 30 Minuten bei 350 °C [51]

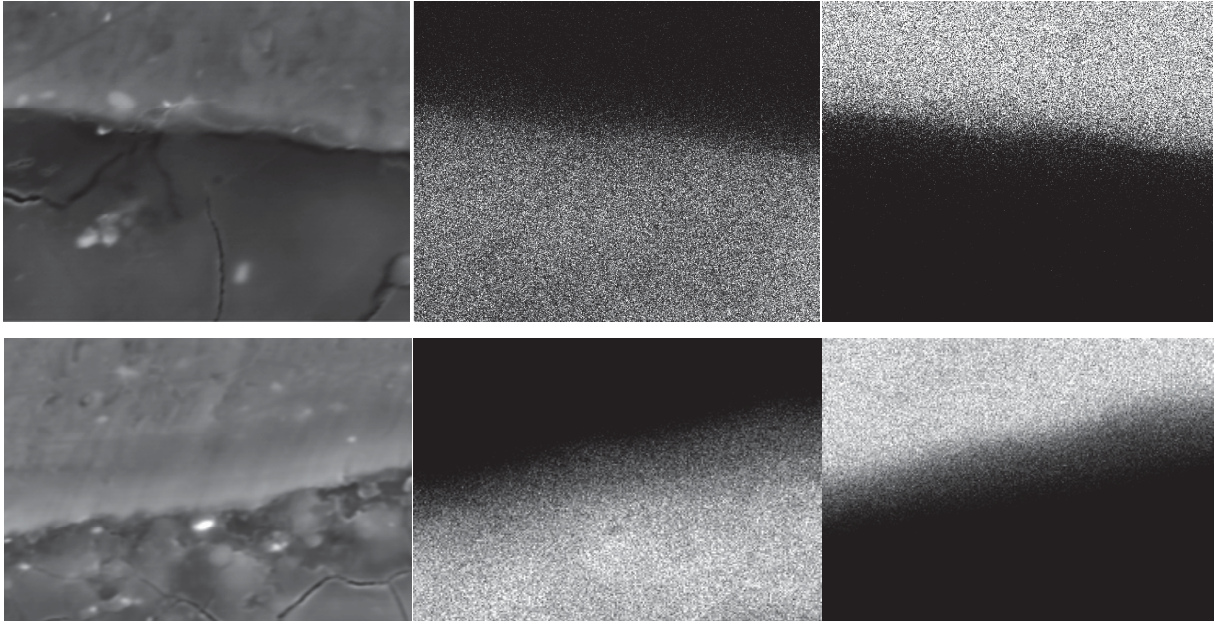


Abbildung 41: Darstellung der Diffusionszone nach zwei unterschiedlichen Glühbehandlungen (a) nach 10 Minuten bei 350 °C (b) nach 30 Minuten bei 350 °C [51]

#### 4.3.5 Mirkohärteverläufe

Um die zuvor genannten Mutmaßungen in Bezug auf die Ausbildung von intermetallischen Phasen in der Verbindungszone verifizieren zu können, wurden unterschiedlich lang gegläute Proben Mirkohärteprüfungen (nach Vickers) unterzogen. Ein sprunghafter Anstieg der Härtewerte kann dabei als deutliches Indiz für die Existenz spröder intermetallischer Phasen gewertet werden [22]. In Abbildung 42 ist ein solcher sprunghafter Anstieg deutlich verzeichnet.

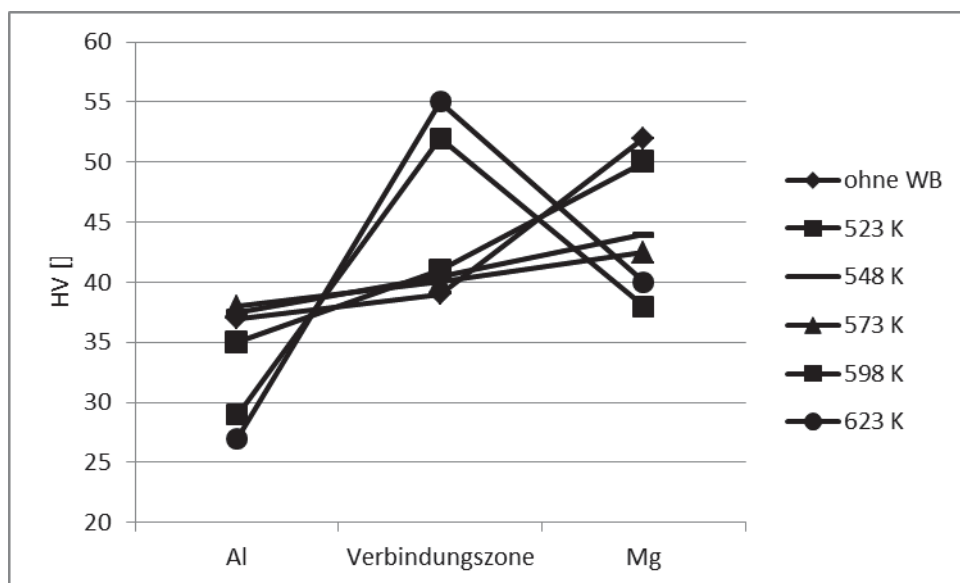


Abbildung 42: Mirkohärteverläufe über den Walzplattierquerschnitt bei unterschiedlich hohen Glühzeiten (nach 10 Minuten Glühzeit)

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Die elementaren Ergebnisse der Optimierung der Werkstoffverbundherstellung sind in Tabelle 7 dargestellt. Die Werte stammen aus speziell an die Anforderungen von Walzplattierverbunden und Magnesiumwerkstoffen angepassten Prüfverfahren, deren Implementierung größtenteils an am Lehrstuhl für Umformtechnik entworfenen Prüfanlagen, erfolgte. Speziell der genormte Hin- und Herbiegeversuch zeigt den großen Einfluss der aufplattierten Aluminiumbleche auf die mechanischen Kennwerte des Verbundes. [50]

Tabelle 7: Wichtige Herstellungsparameter eines walzplattierten AZ31(Mg)-1050(Al)-Verbundwerkstoffes

	<b>Optimum</b>	<b>Minimum</b>
<b>Fügetemperatur</b>	350 °C (623 K)	300 °C (573 K)
<b>Stichabnahme</b>	> 70 %	ca. 50 %
<b>Oberflächenvorbehandlung</b>	keine Auswirkung	

Neben den optimierten Parametern für die Verbundherstellung aus Magnesium und Aluminiumblechen konnten im Zuge dieser Arbeit interessante Ergebnisse aus den praktischen Versuchen (z. B. Einsatz von Stahlummantelung, Graphitspray) gewonnen werden.

Aufbauend aus den Ergebnissen der Hauptversuchsreihe, konnte das Prozessfenster für eine Warmumformung des optimierten Verbundwerkstoffs festgelegt werden (siehe Tabelle 8).

Tabelle 8: Prozessfenster für Warmumformbarkeit des Verbundwerkstoffes

	<b>Minimum/Optimum</b>	<b>Maximum</b>
<b>Umformtemperatur</b>	300 °C (573 K)	350 °C (623 K)
<b>Glühzeitfenster</b>	10 Minuten	15 Minuten
<b>Umformgeschwindigkeit</b>	10 mm/s	nicht definiert

Die besten Ergebnisse in Bezug auf die Warmumformbarkeit zeigen sich zwischen 300–350 °C. Bei diesen erhöhten Temperaturen sind allerdings Diffusionsvorgänge und Phasen Neubildungen zu erwarten. Bei den Tiefungsversuchen wurde ein Optimum der Ergebnisse bei 300 °C Vorwärmtemperatur und einer Umformgeschwindigkeit von 10 mm/s erzielt. Lichtmikroskopische Untersuchungen zeigen, dass in dem gegebenen Temperaturfenster (300–350 °C) nach 10 – 15 Minuten Grobkornbildung zu erwarten ist. REM-Aufnahmen zei-

gen schon nach 10 Minuten Glühzeit eine ausgeprägte Diffusionszone und erste Anzeichen für Kirkendall-Löcher auf der Magnesiumseite. Bei längeren Glühbehandlungen sind ausgeprägte Kirkendall-Löcher zu erwarten. Über die Vickers-Härtemessung kann gezeigt werden, dass bei einer Wärmebehandlung mit 350 °C über einen Zeitraum von 15 Minuten bereits spröde intermetallische Phasen gebildet werden. Aus den gewonnenen Ergebnissen kann das Prozessfenster für die Warmumformung des Mg-Al-Verbundes folgendermaßen festgelegt werden: Die Temperaturführung sollte sich zwischen 300 und 350 °C bewegen, dabei darf die Wärmeeinwirkung aber nicht länger als 10 Minuten betragen, da sonst spröde intermetallische Phasen, Grobkornbildung und Kirkendall-Löcher zu erwarten sind und dadurch die mechanischen Kennwerte des Verbundes deutlich verschlechtert werden. [51]

Wie die erhöhten Forschungsbemühungen auf diesem Gebiet belegen, erlangen Magnesium-Aluminium-Werkstoffverbunde für Leichtbauanwendungen immer größere Bedeutung. Die in dieser Arbeit durchgeführten Umformversuche und metallographischen Auswertungen ergeben ein optimales Umformtemperaturfenster zwischen 300 und 350 °C. Es ist auch ein Zeitfenster zu beachten, da die Ausbildung von intermetallischen Phasen oder Kirkendall-Löchern zu vermeiden sind. Unter Einhaltung dieser Rand- bzw. Fertigungsbedingungen können gut weiterverarbeitbare Mg/Al-Verbunde hergestellt werden. Weitere Optimierungspotentiale in der großtechnischen Fertigung sind durch beheizte Warmumformanlagen, die auf die Anforderungen des Verbundes zugeschnitten sind, zu erwarten.

## Abkürzungsverzeichnis

MW	Mittelwert
RT	Raumtemperatur
MK	Mischkristall
$k_f$	Fließspannung
$n$	Verfestigungsexponent
$m$	Dehnratenexponent
$r$	senkrechte Anisotropie
$r_m$	mittlere senkrechte Anisotropie
$\Delta r$	ebene Anisotropie
$\sigma$	Spannung
$\varepsilon$	Formänderung
$\varphi$	logarithmische Formänderung
$\dot{\varphi}$	Dehnrade
$\rho$	Dichte
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
Al	Aluminium
Mg	Magnesium
Zn	Zink
Fe	Eisen
Cu	Kupfer
SZMT	Salzgitter Magnesium-Technologie GmbH (ehemaliger Hersteller von Magnesiumblechen)
B	kennzeichnet zweite Entwicklungsstufe des Magnesiumwerkstoffes AZ31
hdp	hexagonal dichteste Packung
krz	kubisch raumzentrierte Kristallstruktur
krz	kubisch flächenzentrierte Kristallstruktur
$T_{\text{REX}}$	Rekristallisationstemperatur
$T_{\text{M}}$	Schmelztemperatur

---

## Literaturverzeichnis

- [1] Asemabadi, M., M. Sedighi und M. Honarpisheh: Investigation of cold rolling influence on the mechanical properties of explosive-welded Al/Cu bimetal, *Materials Science & Engineering A558* (2012) 144–149;
- [2] Bae, J., A. Prasada Rao, K. Kim und N.J. Kim: Cladding of Mg alloy with Al by twin-roll casting, *Scripta Materialia* 64 (2011) 836–839;
- [3] Bauer, D.: Tiefziehen von aluminiumwalzplattierten Feinblechen mit biologisch abbaubaren Schmierstoffen, *Materialwissenschaften & Technik* 46 (1992) 6 559–565;
- [4] Bay, N.: Real area of contact between a rough tool and a smooth workpiece at high normal pressures, *Wear* 38 (1976) 225–234;
- [5] Bay, N.: Cold pressure welding, *Journal of Engineering for Industry* (1979) 101121–128;
- [6] Bay, N.: Friction and Adhesion in metal forming and cold welding, Technische Universität Dänemark, Dissertation, (1985);
- [7] Bowden, F. et al.: The adhesion of clean metals, *Metals* 233 a (1956);
- [8] Buchmayr, B.: Innovative Beiträge der Umformtechnik zum Leichtbau von Kraftfahrzeugen, *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 152 (2007) 5 136–143;
- [9] Buchner, M.: Bestimmung der Einflussfaktoren auf die Haftfestigkeit von Aluminium-Stahl-Verbundblechen, Dissertation, Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Umformtechnik, (2008);
- [10] Carreño, F. et al.: Microstructure and fracture properties of an ultrahigh carbon steel–mild steel laminated composite, *Scripta Materialia* 48 (2003) 8 1135–1140;
- [11] Chang, D.-F.: Thermal stresses in work rolls during the rolling of metal strip, *Journal of Materials Processing Technology* 94 (1999) 45–51;
- [12] Chan, R.: *Physical metallurgy*, Elsevier Science B.V., Amsterdam, Auflage 1, ISBN: 0-444-89875-1, (1996);
- [13] Chaudhari, G.P. und V. Acoff: Cold roll bonding of multi-layered bi-metal laminate composites, *Composites Science and Technology* 69 (2009) 10 1667–1675;
- [14] Avedesian, M.: *Magnesium and magnesium alloys*, ASM International, Auflage 1, (1999), ISBN: 0-87170-657-1;
- [15] Chemingui, M. et al.: Effect of heat treatment on plasticity of Al–Zn–Mg alloy: Microstructure evolution and mechanical properties, *Physics Procedia* 2 (2009) 3 1167–1174.
- [16] Doege, E. und B. Behrens: *Handbuch Umformtechnik*, Springer, Heidelberg, Auflage 2, ISBN: 978-3-642-04248-5, (2010);
- [17] Eizadjou, M. et al.: Mechanism of warm and cold roll bonding of aluminum alloy strips, *Materials & Design* 30 (2009) 10, Seite: 4156–4161;
- [18] Glicksmann, M.E.: *Diffusion in solids, field theory, solid-state principles, and applications*, Wiley Verlag, New York, (2000), ISBN: 978-0-471-23972-7;
- [19] Gao, Y., C. Wang, H. Pang, H. Liu und M. Yao: Broad-beam laser cladding of Al–Cu alloy coating on AZ91HP magnesium alloy, *Applied Surface Science* 253 (2007) 4917–4922;
- [20] García, C., D. Celentano, F. Flores, J.-P. Ponthot und O. Oliva: Numerical modelling and experimental validation of steel deep drawing processes, *Journal of Materials Processing Technology* 172 (2006) 461–471;
- [21] Gernet, A.: Tiefungsversuch nach Erichsen, Fachhochschule Südwestfalen, Hochschule für Technik und Wirtschaft, Labor für Werkstofftechnik, [http://www4.fh-swf.de/media/downloads/fbma/download\\_7/professorinnen/schulzbeenken/download\\_19/wintersemester/praktikumsunterlagen/V4\\_Erichsen\\_Tiefung.pdf](http://www4.fh-swf.de/media/downloads/fbma/download_7/professorinnen/schulzbeenken/download_19/wintersemester/praktikumsunterlagen/V4_Erichsen_Tiefung.pdf), Abruf: 20.08.2012;
- [22] Gottstein, G.: *Physikalische Grundlagen der Materialkunde*. Springer, Heidelberg, Auflage 2, ISBN: 3-540-41961-6, (2001);
- [23] Gumpetsberger, B.: *Bulge Testing – Charakterisierung unterschiedlicher Blechwerkstoffe und Schweißverbindungen*, Diplomarbeit, Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Umformtechnik, (2012);

- 
- [24] Hajjari, E. et al.: Intermetallic compounds and antiphase domains in Al/Mg compound casting, *Intermetallics* 23 (2012) 182–186;
- [25] Beck, A. und H. Altwickler: *Magnesium und seine Legierungen*, Berlin, Auflage 2, Springer, (2001), ISBN: 3-540-41675-7;
- [26] Inoue, T. und N. Tsuji: Quantification of strain in accumulative roll-bonding under unlubricated condition by finite element analysis, *Computational Materials Science* 46 (2009) 1 261–266.
- [27] Jeong, H.T. und T.K. Ha: Texture development in a warm rolled AZ31 magnesium alloy, *Journal of Materials Processing Technology* 187–188 (2007) 559–56;
- [28] Jin, Y. und T. Khan: Effect of bonding time on microstructure and mechanical properties of transient liquid phase bonded magnesium AZ31 alloy, *Materials & Design* 38 (2012) 32–37;
- [29] Kainer, K.: *Metallische Verbundwerkstoffe*, Wiley, Weinheim, Auflage 1, ISBN: 978-3527-305-322, (2003);
- [30] Kammer, C.: *Magnesiumtaschenbuch*, Aluminium-Verlag, Marketing & Kommunikation GmbH, Düsseldorf, Auflage 1, ISBN: 978-3870-172640, (2000);
- [31] Kammer, C.: *Aluminium Taschenbuch 1*, Grundlagen und Werkstoffe, Aluminium-Verlag, Marketing & Kommunikation GmbH, Düsseldorf, Auflage 15, ISBN: 3-87017-274-6, (2002);
- [32] Kang, C. et al.: Formation of shear texture components during hot rolling of AA 1050, *Journal of Materials Processing Technology* 187-188 (2007) 542–545;
- [33] Kim, E.-Y. et al.: Evolution of deformation texture in Al/Al–Mg/Al composite sheets during cold-roll cladding, *Materials Science and Engineering A* 530 (2011) 244–252;
- [34] Kim, S.-H. et al.: Effect of wire brushing on warm roll bonding of 6XXX/5XXX/6XXX aluminum alloy clad sheets, *Materials & Design* 35 (2012) 290–295;
- [35] Larsson, H., H. Strandlund und M. Hillert: Unified treatment of Kirkendall shift and migration of phase interfaces, *Acta Materialia* 54 (2006) 945–951;
- [36] Lenard, J.G.: The effect of roll roughness on the rolling parameters during cold rolling of an aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology* 152 (2004) 2 144–153;
- [37] Li, M., T. Tamura und K. Miwa: Controlling microstructures of AZ31 magnesium alloys by an electromagnetic vibration technique during solidification: From experimental observation to theoretical understanding, *Acta Materialia* 55 (2007) 4635–4643;
- [38] Liu, C.Y.: Fabrication of Al/Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub> composite by vacuum annealing and accumulative roll-bonding process, *Materials Science & Engineering A* 558 (2012) 510–516;
- [39] Liu, X. et al.: Preliminary investigations on the Mg–Al–Zn/Al laminated composite fabricated by equal channel angular extrusion. *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2009) 10, 4675–4681;
- [40] Manesh, D. und K. Taheri: An investigation of deformation behavior and bonding strength of bimetal strip during rolling, *Mechanics of Materials*, 37 (2005) 5 531–542;
- [41] Manesh, H.D. und A.K. Taheri: Theoretical and experimental investigation of cold rolling of tri-layer strip, *Journal of Materials Processing Technology* 166 (2005) 163–172;
- [42] Matsumoto, H. et al.: Fabrication of pure Al/Mg–Li alloy clad plate and its mechanical properties, *Journal of Materials Processing Technology* 169 (2005) 1 9–15;
- [43] Miao, Q. et al.: Fabrication of excellent mechanical properties AZ31 magnesium alloy sheets by conventional rolling and subsequent annealing, *Materials Science and Engineering, A* 528 (2011) 22-23 6694–6701;
- [44] Neugebauer, R.: *Umformende Herstellung von Al/Mg-Werkstoffverbunden*, *Mat.-wiss. u. Werkstofftechnik* (2009) 40 506–511;
- [45] Paul, A. et al.: The Kirkendall effect in multiphase diffusion, *Acta Materialia* 52 (2004) 3 623–630.
- [46] Pulker, H.: *Korrosionsschutz von metallischen Oberflächen durch Beschichtungen*, OTTI, Regensburg, Auflage 1. (2006);
- [47] Quadir, M.: Influence of processing parameters on the bond toughness of roll-bonded aluminium strip, *Scripta Materialia* (2008) 58 959–962;
-

- [48] Röhr, C.: Synthesen von Festkörpern, Präparative Methoden: <http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/zintl.html>;
- [49] Salzgitter Magnesium-Technologie GmbH: Produkte und Produktinformation – Beigelegt bei Lieferungen;
- [50] Schlögl, C.M.: Herstellung und Umformbarkeit walzplattierter Magnesium(AZ31)-Aluminium(1050)-Verbunde, BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 7 (2011) 156 249–254;
- [51] Schlögl, C.M.: Optimierte Herstellungs- und Wärmebehandlungsparameter walzplattierter Magnesium(AZ31)-Aluminium(1050)-Verbundwerkstoffe, BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 8-9 (2012) 157 313–318;
- [52] Schmitthen, M.: Plattieren, [www.plattieren.de](http://www.plattieren.de);
- [53] Schreckenberger, H.: Korrosion und Korrosionsschutz von Magnesium-Werkstoffen für den Automobilbau – Problematik der Kontaktkorrosion, Darmstadt, (2000);
- [54] Seperant, F.: Interdiffusion des Aluminium-Magnesium-Systems - Quantitative Analyse und numerische Modellierung, Dissertation, Erlangen-Nürnberg, Technische Universität (2012);
- [55] Soltan Ali Nezhad, M. und A. Haerian Ardakani: A study of joint quality of aluminum and low carbon steel strips by warm rolling, *Materials and Design* 30 (2009) 1103–1109;
- [56] Strandlund, H. und H. Larsson: Prediction of Kirkendall shift and porosity in binary and ternary diffusion couples, *Acta Materialia* 52 (2004) 4695–4703;
- [57] Lampke, T. et al.: Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit von Magnesium durch Beschichten und Wärmebehandeln, Lehrstuhl für Verbundwerkstoffe, TU Chemnitz, Forschungsvereinigung DGO, Förderung der „Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)“, (2012);
- [58] Taschauer, M.: Lehrstuhl für Umformtechnik, Montanuniversität Leoben, Ausstattung, [www.metalfforming.at](http://www.metalfforming.at), Abruf: 20.10.2012;
- [59] Tzou, G.: Theoretical study on the cold sandwich sheet rolling considering Coulomb friction, *Journal of Materials Processing Technology* (2001) 114 41–50;
- [60] Tzou, G. et al.: Analytical approach to the cold-and-hot bond rolling of sandwich sheet with outer hard and inner soft layer, *Journal of Materials Processing Technology* (2002) 125-126 664–669;
- [61] Kitter, K., Awiszus B., Lehmann T. und Stockmann M.: Numerische und experimentelle Untersuchungen zur Herstellung von stranggepressten Aluminium/Magnesium-Werkstoffverbunden und zur Festigkeit des Interface, *Materialwissenschaften und Werkstofftechnik* (2009) 40, No. 7;
- [62] Walling, J.: Plattieren mit kinetischer Energie, Berlin, ISBN: OCLC174442419, (1974);
- [63] Weck, A. et al.: Mechanical properties of the aluminum roll-bond laminate AA5005–AA5083–AA5005, *Materials Science and Engineering, A* 528 (2011) 19-20 6186–6193;
- [64] Wiedemann, J.: Leichtbau, Springer, Berlin, Auflage 3, ISBN: 978-540-33656-3, (2007);
- [65] Yoon, J.: Fabrication and brazeability of a three-layer 4343/3003/4343 aluminium clad sheet by rolling, *Journal of Materials Processing Technology* (2001) 111 85–89;
- [66] Zhang, B.-P., Y.-F. Tu, J.-Y. Chen, H.-L. Zhang, Y.-L. Kang und H.G. Suzuki: Preparation and characterization of as-rolled AZ31 magnesium alloy sheets, *Journal of Materials Processing Technology* 184 (2007) 102–107;
- [67] Zhang, X. et al.: Proposal of bond criterion for hot roll bonding and its application. *Materials & Design* 32 (2011) 4 2239–2245;
- [68] Zhang, X., S. Castagne, T. Yang, C. Gu und J. Wang: Entrance analysis of 7075 Al/Mg–Gd–Y–Zr/7075 Al laminated composite prepared by hot rolling and its mechanical properties, *Materials and Design* 32 (2011) 1152–1158;
- [69] Zhang, X., T. Yang, S. Castagne und J. Wang: Microstructure, bonding strength and thickness ratio of Al/Mg/Al alloy laminated composites prepared by hot rolling, *Materials Science and Engineering A* 528 (2011) 1954–1960;



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau des Walzplattierprozesses – auf ein Grundblech werden zwei Auflagebleche aufgewalzt – es entsteht ein sogenannter Sandwichverbund [52].....	4
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Bindungsbildung [9] (a) Annäherung der Rauigkeitsspitzen und (1) (2) erstes Aufreißen der Oxidschichten (b) Oxidschicht zerfällt in einzelne Inseln (c) Reines Grundmaterial wird zwischen den Oxidinseln extrudiert (3) (d) im Bereich (4) kommt es zur Verschweißung des Grundmaterials .....	5
Abbildung 3: Schematische Skizze der Adhäsionsbildung unter Druck [9].....	6
Abbildung 4: Bindungszone zwischen unterschiedlichen Metallen nach dem Walzplattierprozess [9] .....	8
Abbildung 5: Zusammenhänge zwischen den wichtigsten Herstellungs- und Systemparametern beim Walzplattieren [50].....	9
Abbildung 6: Einwirkung technisch vorgegebener Größen auf die den Bindungsvorgang beeinflussenden Faktoren [9] .....	9
Abbildung 7: Prinzipskizze des Kirkendall-Effekts am Beispiel Kupfer-Zink [48].....	11
Abbildung 8: Vergleich zwischen der mikroskopischen und der makroskopischen Oberflächenvergrößerung bei der Umformung [9].....	12
Abbildung 9: Schematische Darstellung der Oberflächenschichten [9] .....	13
Abbildung 10: Kräfte im Walzspalt beim Greifen [16] .....	15
Abbildung 11: Phasendiagramm Al-Mg mit hervorgehobener $Al_{12}Mg_{17}$ -Verbindung [25] .....	17
Abbildung 12: Struktur in der Verbindungszone zwischen Aluminium- und Magnesiumblechen nach dem Plattieren [2].....	18
Abbildung 13: Konzentrationsverlauf von Magnesium und Aluminium in einer Walzplattierverbindungszone [69].....	19
Abbildung 14: Aufbau eines Walzpaketes mit Positionierung der Punktschweißungen – die rote Markierung zeigt den für die Erfüllung der Greifbedingung relevanten Bereich .....	25
Abbildung 15: Umluftofen am Lehrstuhl für Umformtechnik Carbolite HT6/28 .....	26
Abbildung 16: Walzplattierverbund mit Rissbildung an den Rändern [50].....	26
Abbildung 17: Alicona Infinite Focus G4 .....	28
Abbildung 18: Skizze der Hin- und Herbiegeversuchsanlage am Lehrstuhl für Umformtechnik [9,50].....	29
Abbildung 19: Versuchsanlage am Lehrstuhl für Umformtechnik [50].....	29
Abbildung 20: Einspannung beim Schälversuch (a) Grundplatte (aufgeschraubt auf ZWICK-Versuchsanlage) (b) Aluminiumblech (c) Magnesiumblech (d) drehbar gelagerte Walze (e) Dorn zum Auftrennen des Verbundes (f) Angriffspunkt der Zugkraft [50].....	30
Abbildung 21: Querschnitt des Schälversuches [50] .....	31

---

Abbildung 22: Probengeometrie für Zugversuche (Angaben in mm), $h$ setzt sich aus den Dicken der einzelnen Bleche zusammen.....	32
Abbildung 23: Tiefungsvorrichtung (Ofenaufheizung und anschließend in Pressvorrichtung eingespannt) (a) Fundament aus Stahl mit aufgeschweißtem Führungsring (b) Nöpfchen (c) Niederhalterring (d) Pressstempel.....	33
Abbildung 24: Druckprüfmaschine am Lehrstuhl für Umformtechnik.....	33
Abbildung 25: (a) Gleeble3800-Prüfsystem, (b) Kupferbacken mit stark erhitzter Probe (nicht aus dieser Arbeit) [58].....	34
Abbildung 26: REM am Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie .....	35
Abbildung 27: Temperaturverlauf während des Walzprozesses (a) Kontakt mit Walze (b) Ablösen des Kontaktes (c) erneutes Anpressen durch Walzkraft (d) endgültiges Ablösen des Thermoelementes.....	38
Abbildung 28: Temperaturverlauf während des Walzprozesses (a) Kontakt mit Walze (b) Ablösen des Kontaktes (c) erneutes Anpressen durch Walzkraft (d) endgültiges Ablösen des Thermoelementes.....	39
Abbildung 29: Hochgeschwindigkeitskameraaufnahme während Hin- und Herbiegebewegung, (a) Rissinitialisierung an der Außenseite des Magnesiumwerkstoffs (b) Riss breitet sich ins Innere fort (c) Geringfügiges Ablösen der Magnesiumschicht von dem Aluminiumblech (d) Riss wird ausgeweitet, Werkstoffverbund versagt.....	40
Abbildung 30: Ertragene Biegezahlen in Korrelation zur Plattierfolge.....	41
Abbildung 31: Ertragene Biegezahlen über der prozentuellen Stichabnahme .....	42
Abbildung 32: Aufzubringende Zugkraft zum Ablösen des Aluminiumblechs vom Magnesiumgrundblech – über die bei der Umformung vorherrschende Temperatur .....	43
Abbildung 33: Aufzubringende Zugkraft zum Ablösen der Aluminiumbleche von den Magnesiumgrundblechen – aufgetragen über die während des Walzplattierens durchgeführte Stichabnahme.....	43
Abbildung 34: Geätzter Plattierquerschnitt mit schlecht aufgelöster Verbindungszone .....	44
Abbildung 35: 3D-Aufnahme der Verbindungszone zwischen den Blechen (a) in Echtfarben (b) in Falschfarben aufgelöst nach der Höhenverteilung in $\mu\text{m}$ .....	45
Abbildung 36: Nöpfchenprüfling mit typischem Versagensprofil [51].....	47
Abbildung 37: Korngefüge der AZ31-Legierung nach einer Glühzeit von 10 Minuten.....	48
Abbildung 38: Korngefüge der AZ31-Legierung nach einer Glühzeit von 15 Minuten.....	48
Abbildung 39: Korngefüge der AZ31-Legierung nach 20 minütiger Glühzeit .....	48
Abbildung 40: REM Aufnahmen der Verbindungszone nach unterschiedlich langen Wärmebehandlungsvorgängen (a) 10 Minuten bei 350 °C (b) 30 Minuten bei 350 °C [51]...	49
Abbildung 41: Darstellung der Diffusionszone nach zwei unterschiedlichen Glühbehandlungen (a) nach 10 Minuten bei 350 °C (b) nach 30 Minuten bei 350 °C [51]....	50

---

Abbildung 42: Mikrohärteverläufe über den Walzplattierquerschnitt bei unterschiedlich hohen Glühtemperaturen (nach 10 Minuten Glühzeit)..... 50

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammensetzung der AZ31-Legierung in Gew.% [57] .....	20
Tabelle 2: Physikalische Eigenschaften der AZ31-Legierung [49] .....	21
Tabelle 3: Zusammensetzung der Al1050-Legierung in Gew.% [31] .....	22
Tabelle 4: Physikalische Eigenschaften der 1050-Legierung [31] .....	22
Tabelle 5: Parameterschranken ermittelt aus der Vorversuchsreihe .....	37
Tabelle 6: Ergebnisse der Näpfchentests [51] .....	46
Tabelle 7: Wichtige Herstellungsparameter eines walzplattierten AZ31(Mg)-1050(Al)- Verbundwerkstoffes .....	51
Tabelle 8: Prozessfenster für Warmumformbarkeit des Verbundwerkstoffes .....	51