

# **Entwicklung einer Prüfmethode zur Charakterisierung der Haftfestigkeit im Gusszustand gießtechnisch hergestellter Aluminium-Verbundwerkstoffe**

Masterarbeit:

Johannes Josef Reisenberger, BSc

Montanuniversität Leoben

Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau

Betreuer:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Florian Grün

Dipl.-Ing. Falko Langbein, Miba Gleitlager GmbH

***Innovation in Motion***



Projektnummer - Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau:

AMBD14/10

Projektnummer - Miba Gleitlager GmbH:

74001222 – 74001229

Laakirchen, Februar 2015

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich mich besonders bei Herrn Dipl.-Ing. Falko Langbein von der Firma Miba Gleitlager GmbH, für die hervorragende Betreuung meiner Bachelor- sowie auch meiner Masterarbeit bedanken.

Des Weiteren gilt mein Dank den Betreuern seitens des Lehrstuhls für Allgemeinen Maschinenbau der Montanuniversität Leoben, insbesondere Herrn Professor Dipl.-Ing. Dr.mont. Florian Grün, sowie Herrn Dipl.-Ing. Dr.mont. István Gódor.

Da ich mit dieser Arbeit mein Studium abschließe, möchte ich mich besonders bei meinen Eltern, Johann und Helene Reisenberger für die Ermöglichung meines Studiums sowie bei meiner Lebenspartnerin Michaela und unserer Tochter Sarah für die Unterstützung bedanken.

Abschließend möchte ich mich auch bei allen Kolleginnen und Kollegen der Firma Miba Gleitlager GmbH sowie den Mitgliedern des Akademischen Turnvereins Leoben für die Unterstützung während meines Studiums bedanken.

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt, die den benutzten Quellen entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Diese Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

A handwritten signature in blue ink that reads "Johannes Reisenberger". The signature is written in a cursive style with a horizontal line underneath the name.

Johannes Reisenberger

Laakirchen, 24.02.2015

## **Kurzfassung**

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurden verschiedenen Prüfverfahren untersucht, mit denen eine Klassifizierung eines gießtechnisch hergestellten Werkstoffverbundes hinsichtlich der Bindefestigkeit möglich ist. Hauptziel war es eine Methode zu finden, mit deren Hilfe ein quantitativer Haftfestigkeitswert ermittelt werden kann.

Im Zuge einer Literaturrecherche wurden unterschiedliche Verfahren verglichen und entsprechend ihrer Eignung überprüft. Aus den Ergebnissen der Recherche wurden vier Analyseverfahren für Versuche mit verbundgegossenen Materialien ausgewählt.

Die verschiedenen Testmethoden zeigten, dass die Bindung mit allen ausgewählten Verfahren qualitativ analysiert werden kann. Im Rahmen des Vergleichs der unterschiedlichen Prüfmethode konnte festgestellt werden, dass die Resultate der Haftfestigkeit der unterschiedlichen Prüfverfahren korrelieren, wenn gleich die Prüfungen unterschiedliche Messwerte ergaben. Bezüglich einer quantitativen Haftfestigkeitsanalyse lieferten nur der Zugversuch sowie der Zentrifugentest ein, den Anforderungen entsprechendes, Ergebnis.

Für eine zukünftige Materialprüfung der Verbunde im Gusszustand sind auf Grund der quantitativen Aussagekraft der Zugversuch sowie der Zentrifugentest zu empfehlen.

Sollte die Schichtdicke des Aufgussmaterials im weiteren Entwicklungsprozess auf Werte unterhalb von drei Millimetern reduziert werden, so ist eine Materialprüfung mittels Zugversuch auf Grund der zu geringen Einspannfläche nicht mehr möglich.

In diesem Fall ist eine Überprüfung der Bindung mit Hilfe des Zentrifugentests anzuraten, da hier die Schichtdicke der Aufgusslegierung auf unter drei Millimetern reduziert werden kann. Um diese Anforderung erfüllen zu können, ist jedoch eine Adaptierung der Prüfvorrichtung notwendig.

## **Abstract**

This thesis investigates different test methods to find and measure the bond strength of a composite cast material.

The main objective was to find the best suited test method that allowed a quantitative bond strength value to be specified and to ensure that the test gives reproducible results.

According to the literature, different methods were compared and checked for their suitability. From this investigation, four measurement methods were selected for further inspection.

Through multiple tests of the composite cast material using the four test methods it was found that the bond strength could be qualitatively measured with all of the selected methods, however good reproducible quantitative data for the bond strength was only seen with the tensile and centrifuge test.

Due to these results for quantitative material testing the recommendation would be either the tensile test method or the centrifuge test method.

In broader development it is envisioned that the upper casting material of the composite cast will be thinner. If this is the case testing by the tensile method would be no longer possible and the centrifuge test method would be recommended.

## Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis .....	1
Gleichungsverzeichnis .....	3
1. Einleitung .....	4
1.1 Projekthintergrund .....	4
1.2 Aufgabenstellung .....	4
2. Grundlagen .....	5
2.1. Gleitlagertechnologie .....	5
2.2. Verbundwerkstoffe und ihre Herstellung .....	7
2.3. Haftfestigkeitsprüfverfahren .....	9
2.3.1. Zugversuch (adaptiert für Verbundproben) .....	10
2.3.2. Chalmers-Test .....	11
2.3.3. Zugscherversuch .....	13
2.3.4. Druckscherversuch .....	14
2.3.5. Schälprüfung .....	15
2.3.6. Wedge-Test .....	17
2.3.7. Stoßversuch .....	18
2.3.8. Verwindungstest .....	19
2.3.9. Zentrifugentest .....	19
2.3.10. Ollard-Test .....	21
3. Versuchsmethodik .....	22
3.1. Vormaterialherstellung .....	22
3.2. Metallographische Charakterisierung .....	25
3.3. Charakterisierung des Ausgangsmaterials .....	25
3.4. Zugprüfung .....	26
3.4.1. Berechnung und Konstruktion .....	26
3.4.2. Probengeometrie .....	27
3.4.3. Prüfparameter .....	28
3.5. Zentrifugenprüfung .....	29
3.5.1. Berechnung .....	29
3.5.2. Probengeometrie .....	30
3.5.3. Prüfparameter .....	30
3.6. Wedge-Test .....	32
3.6.1. Konstruktion .....	32
3.6.2. Probengeometrie .....	32
3.6.3. Prüfparameter: .....	33
3.7. Stoßprüfung .....	33
3.7.1. Berechnung und Konstruktion .....	33

3.7.2.	Probengeometrie.....	35
3.7.3.	Prüfparameter .....	35
4.	Ergebnisse.....	36
4.1.	Materialauswahl .....	36
4.2.	Zugprüfung .....	36
4.3.	Untersuchung der Einzelkomponenten der Verbunde.....	42
4.4.	Zentrifugentest.....	42
4.5.	Wedge-Test.....	46
4.6.	Stoßprüfung .....	52
4.7.	Korrelation der Ergebnisse .....	59
5.	Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse.....	64
6.	Ausblick.....	67
7.	Begriffserklärung.....	68
8.	Literaturverzeichnis .....	72
9.	Anhang .....	76
9.1	Anhang A - Probenentnahme .....	76
9.2	Anhang B - Prüfvorrichtungen .....	76
9.3	Anhang C - Prüfkörper .....	82
9.4	Anhang D - Ergebnisse.....	83
9.4.1	Anhang D1 - Ergebnisse Zugversuch.....	83
9.4.2	Anhang D2 - Ergebnisse Untersuchung der Einzelkomponenten .....	109
9.4.3	Anhang D3 - Ergebnisse Zentrifugentest .....	112
9.4.4	Anhang D4 – Ergebnisse Wedge-Test .....	116
9.4.5	Anhang D5- Ergebnisse Stoßversuch.....	121
9.4.6	Anhang D6 – Ergebnisse Korrelationsüberprüfung .....	130
10.	Abbildungsverzeichnis .....	133
11.	Tabellenverzeichnis .....	138

## Abkürzungsverzeichnis

<b>Zeichen/Abkürzung</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Einheit</b>
$\mu_1$	Reibungswert Klemmkraftberechnung	-
$\mu_k$	Reibungskoeffizient im Gewinde	-
$A_C$	Klebefläche	mm <sup>2</sup>
$a_S$	Breite des Schneidwerkzeugs	mm
$A_{SZ}$	Prüffläche Scherzugversuch	mm <sup>2</sup>
$A_Z$	Prüffläche Zugversuch	mm <sup>2</sup>
$b_{SZ}$	Probendicke Zugscherversuch	mm
$b_Z$	Probendicke Zugversuch	mm
$d_2$	Flankendurchmesser	mm
$d_m$	Reibdurchmesser Kopfauflage	mm
DOE	Design of Experiment	-
$f$	Vorschub	mm
$F_C$	maximale Zentrifugalkraft	N
$F_{Klemm}$	Klemmkraft	N
$F_{max}$	maximale Prüfkraft	N
$F_S$	Schnittkraft	N
$F_{S\ max}$	Maximale Schnittkraft	N
$j$	Werkstoffkonstante Schnittkraftberechnung	-
$k_1$	Korrekturfaktor Schnittkraftberechnung	-
$k_{C11}$	Spezifische Schnittkraft	N/mm <sup>2</sup>
$l_Z$	Probenbreite Zugversuch	mm
$M_A$	Anzugsmoment	Nm
$m_C$	Masse von Prüfling und Prüfgewicht	g

$r_c$	Abstand des Probenschwerpunkts zur Rotationsachse	mm
$r_k$	Klebeflächenradius	mm
$\ddot{U}$	Überlappungsfläche	mm <sup>2</sup>
utg	Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der technischen Universität München	-
VGM	Verbundgussmodul	-
$z$	Schraubenanzahl	-
$\alpha$	Steigungswinkel	°
$\rho^*$	Gewindereibwert	°
$\sigma$	Festigkeit/Haftfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>
$\tau$	Scherfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>
$\varphi_r$	Einstellwinkel	°

## Gleichungsverzeichnis

Gleichungsnummer	Formel	Einheit
Gl. 1.1	$\sigma = \frac{F_{max}}{A_Z}$	N/mm <sup>2</sup>
Gl. 1.2	$A_Z = l_Z \times b_Z$	mm <sup>2</sup>
Gl. 2.1	$\tau = \frac{F_{max}}{A_{SZ}}$	N/mm <sup>2</sup>
Gl. 2.2	$A_{SZ} = \ddot{U} \times b_{SZ}$	mm <sup>2</sup>
Gl. 3.1	$F_C = m_C \times \omega^2 \times r_C$	N
Gl. 3.2	$\sigma = \frac{F_C}{A_C}$	N/mm <sup>2</sup>
Gl. 3.3	$A_C = r_k^2 \times \pi$	mm <sup>2</sup>
Gl. 4.1	$F_{max} = \sigma \times A_Z$	N
Gl. 4.2	$F_{Klemm} = \frac{F_{max}}{\mu_1 \times z}$	N
Gl. 4.3	$M_A = F_{Klemm} \times \left( \frac{d_2}{2} \times \tan(\alpha + \rho^*) + \frac{d_m}{2} \times \mu_k \right)$	Nm
Gl. 5.1	$F_C = \sigma \times A_C$	N
Gl. 5.2	$\omega = \sqrt{\frac{F_C}{m \times r_C}}$	s <sup>-1</sup>
Gl. 5.3	$n = \frac{\omega}{2 \times \pi}$	U/s
Gl. 6.1	$F_S = k_{C11} \times f^{1-j} \times a_s \times \sin(\alpha_r)^{-j}$	N
Gl. 6.2	$F_{Smax} = F_S \times k_1$	N

# **1. Einleitung**

## **1.1 Projekthintergrund**

In der zukünftigen Motorentechnologie gehen die Anforderungen an die Motorenkomponenten immer mehr in Richtung höherer Leistungsfähigkeit bei niedrigerem Gewicht. Getrieben sind diese Entwicklungen durch immer strengere Umweltgesetzgebungen, mit dem Ziel geringerer Emissionen.

Diese Anforderungen stellen auch an die Gleitlager-Technologie neue Herausforderungen hinsichtlich der Tragfähigkeit und Lebensdauer. Vor allem die Anforderungen an die Dauerfestigkeit werden in Zukunft steigen.

Neben der Entwicklung neuer Legierungen spielt auch die Entwicklung neuer Halbzeugfertigungs-Prozesse eine tragende Rolle. Die gießtechnische Herstellung eines Materialverbundes zwischen zwei Aluminiumwerkstoffen ist unter anderem Bestandteil dieser neuen Technologien. Ziel dieses Verbundguss-Verfahrens ist es, die Qualität der Haftung zwischen den Werkstoffen zu verbessern und somit eine bessere Leistungsfähigkeit zu generieren.

Zur Charakterisierung der Haftung bedarf es, wie auch bei anderen Herstellverfahren, eines Prüfverfahrens zur Überprüfung der Qualität, respektive der Haftfestigkeit.

## **1.2 Aufgabenstellung**

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Prüfmethodik für die Messung der Haftfestigkeit der gießtechnisch hergestellten Aluminiumverbunde zu erarbeiten.

In einer Literaturstudie sollen einerseits bereits vorhandene Haftfestigkeits-Prüfverfahren evaluiert, andererseits neue Prüfstrategien erarbeitet werden.

Diese Prüfverfahren sollen anhand einer zu erarbeitenden Bewertungsmatrix hinsichtlich ihrer Eignung ausgewählt und anschließend bewertet werden.

Bei den verwendeten Werkstoffen handelt es sich um Aluminium-Legierungen, die an den vorhandenen Laborgießanlagen abgegossen wurden. Mit Hilfe der Ergebnisse soll im Anschluss eine Korrelation der Prüfverfahren hergestellt werden.

## 2. Grundlagen

### 2.1. Gleitlagertechnologie

„Ein bedeutender Bestandteil von Motoren aller Art sind, obwohl sie meist ihrer Größe nach nicht hervorstechen, die Lager. Sie dienen dem Zweck, Kräfte bei gegeneinander bewegten Maschinenteilen aufzunehmen und die Führung dieser Elemente zu gewährleisten [1].“

Grundsätzlich kann bei der Lagerung zwischen Wälzlagern und Gleitlagern unterschieden werden. Während bei den Wälzlagern, die Lagerung über verschiedene Wälzkörper hergestellt wird, übernimmt beim Gleitlager die Gleitschicht die Tragfähigkeit sowie die notwendige Gleiteigenschaften.

Zwischen der Gleitschicht und dem zu lagernden Bauteil befindet sich in den meisten Fällen ein fester oder flüssiger Schmierstoff, der eine hydrodynamische Schmierung gewährleistet. Ist dies nicht der Fall, so erfolgt die Schmierung über das Lagermaterial selbst. In diesem Fall spricht man von einer Feststoffschmierung [2].

In der Praxis haben sich bei fast allen Anwendungsbereichen im Motor die Gleitlager durchgesetzt. Grund hierfür sind die guten Dämpfungseigenschaften, eine reduzierte Geräusentwicklung, sowie die Einsatzfähigkeit bei hohen Drehzahlen. Des Weiteren spielt der relativ einfache Aufbau sowie der geringe Gewicht- und Raumbedarf eine wirtschaftlich bedeutende Rolle [3].

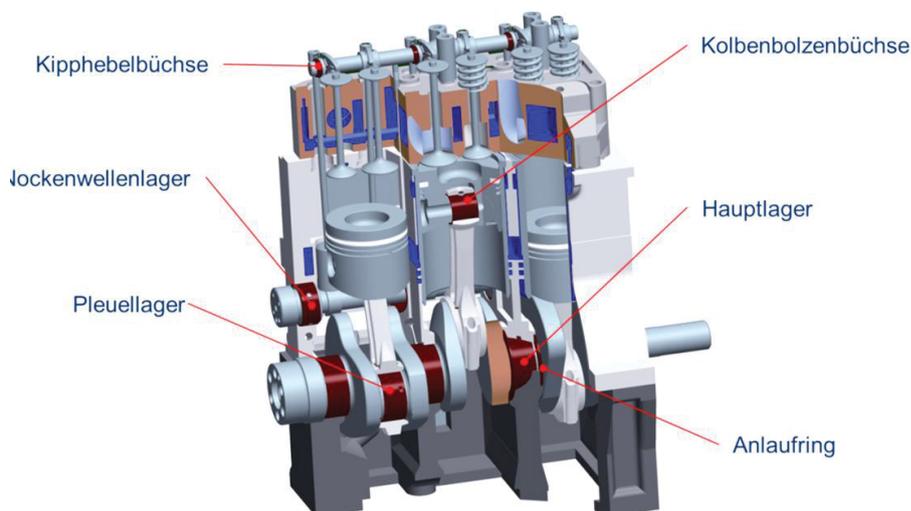
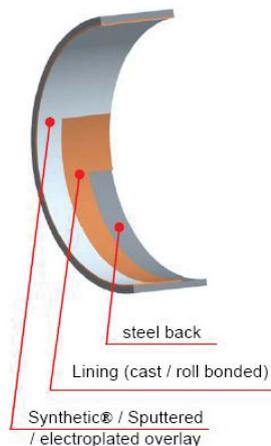


Abbildung 1) Einsatzbereiche Gleitlager am Beispiel eines 3-Zylinder Reihenmotor [4]

Typische Einsatzbereiche von Gleitlagern sind, wie in Abbildung 1 ersichtlich beispielsweise die Pleuellagerung oder die Nockenwellenlagerung [4].

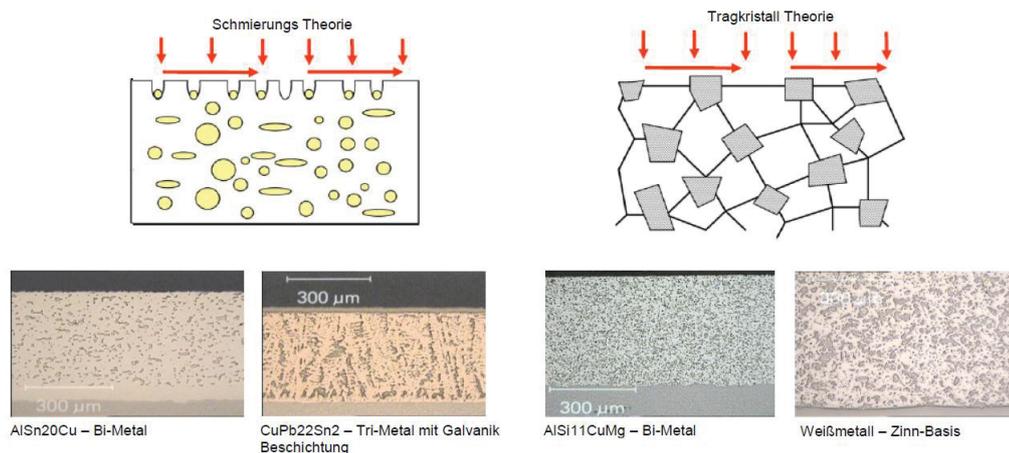
Die Größendimensionen liegen bei den Durchmessern zwischen einigen wenigen Zentimetern im Lastkraftwagen-Bereich bis hin zu knapp einem Meter bei Lagerschalen für 2-Takt Schiffsdieselmotoren.



**Abbildung 2) Aufbau Gleitlager [5]**

Kernelemente des Gleitlagers sind, wie in Abbildung 2 ersichtlich ist, der Stahlstützkörper, die Lagerlegierung sowie, in Abhängigkeit der Anwendung zusätzlich eine Laufschrift. Ziel dieses Mehrschichtaufbaus ist es, die unterschiedlichen Anforderungen an das Gleitlager zu gewährleisten.

Wie aus der Literatur von Grün hervor geht, gewährleistet die Stahlstützschale hierbei die notwendige mechanische Festigkeit sowie die Fixierung im Gehäuse, während die Lagerlegierung die tribologischen Gleiteigenschaften liefert. Die Lagerwerkstoffe können im Wesentlichen in zwei tribologischen Untergruppen unterteilt werden [6].



**Abbildung 3) Arten des Gleitlagerwerkstoffs [6][7]**

Wie in Abbildung 3 auf der linken Seite dargestellt ist, umfasst die erste Gruppe jene Legierungen, die aus einer harten Grundgefügematrix mit einer weichen Phase bestehen. Auch die in dieser Arbeit betrachteten Aluminium-Zinn-Legierungen sind dieser Gruppe zuzuordnen. Während das Aluminium als harte Matrix die Tragfähigkeit gewährleistet,

findet das Zinn als weiche Phase in den verbesserten Notlaufeigenschaften seinen Einsatz.

Die zweite Gruppe auf der rechten Seite der Abbildung 3, besteht aus einer weichen Matrix mit harten Phasen, die die tribologische Tragfähigkeit übernehmen. Ein Beispiel hierfür sind Zinn-Basis-Legierungen, wie sie im Großlager-Sektor eingesetzt werden, bei denen das Zinn dann die weiche Matrix bildet.

Die Laufschrift übernimmt, je nach Anwendungsbereich verschiedene tribologische Aufgaben. Beispiele für solche Schichten wären synthetisch oder galvanisch aufgebraute Laufschriften [8].

Neben den hier betrachteten Mehrschichtlagern gibt es in speziellen Einsatzbereichen auch Massivlagerschalen, die aus lediglich einer Materialschrift bestehen.

Wie bereits eingangs erwähnt, werden im Rahmen dieser Arbeit nur Aluminium-Zinn-Werkstoffe mit einer festen Matrix sowie einer weichen Zinnphase betrachtet.

## **2.2. Verbundwerkstoffe und ihre Herstellung**

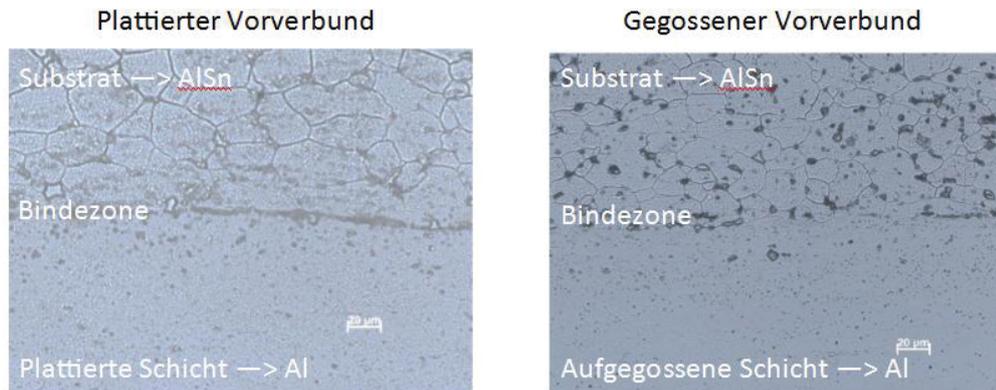
Bei den in dieser Arbeit betrachteten Aluminium-Zinn-Legierungen wird der Verbund zum Stahlrücken über eine Bindefolie hergestellt. Die Herstellung dieses sogenannten Vorverbundes erfolgte bisher durch das Walzplattieren.

Hierbei werden, wie in der Literatur von Schmidtchen genauer erklärt wird, zwei Metalle mit Hilfe von rotierenden Werkzeugen, die als Walzen bezeichnet werden, verbunden [9]. Bevor dieser Verbund hergestellt werden kann, sind verschiedenste Oberflächenbehandlungsschritte notwendig (u.a. Entfetten, Schleifen,...).

Im Zuge der Entwicklung neuer Lagerlegierungskonzepte hat sich herausgestellt, dass die Verbundbildung zwischen Bindefolie und Lagermetall, insbesondere bei höherfesten Aluminium-Werkstoffpaarungen fehleranfällig ist. Aus diesem Grund gehen neue Technologien in Richtung der gießtechnischen Verbundherstellung.

Wie aus dem Artikel von Langbein in den Ranshofner Leichtmetalltagen hervorgeht, wird bei diesem Verfahren auf einen gegossenen Aluminiumwerkstoff eine zweite Legierung gießtechnisch aufgebracht [10]. Dieses horizontale Verbundgießen wurde bis dato nur im Rahmen universitärer Forschungen betrachtet [11].

Die rechte Seite in Abbildung 4 zeigt den Aufbau eines walzplattierten (linkes Bild) sowie eines gegossenen (rechtes Bild) Vorverbundes. Beim Plattieren entsteht eine künstliche Grenzfläche zwischen der Werkstoffpaarung. Die Grenzfläche weist lokal eine andere Zusammensetzung auf und wird durch chemische Ätzung sichtbar (dunkler Bereich in Bindezone).



**Abbildung 4) Gegenüberstellung Plattieren vs. Verbundgießen [10]**

Bei der gießtechnischen Verbundherstellung wird in einem ersten Schritt ein Substratmaterial im Stranggussprozess gegossen. Anschließend wird mit Hilfe eines Gießsystems auf das noch heiße Substratmaterial eine zweite Legierung aufgebracht. Hierbei kommt es zum Aufschmelzen der Substratoberfläche und bei der Erstarrung zur Ausbildung eines metallurgischen Verbunds zwischen Substrat und Aufgusslegierung.

Durch das Aufschmelzen und das anschließende Erstarren kommt es zu einem Stoffschluss, wohingegen beim Walzplattieren nur ein Form- beziehungsweise Kraftschluss vorliegt.

Die Herausforderung bei diesem Verfahren liegt darin, dass die Prozessparameter so zu wählen sind, dass es einerseits zu keiner vorzeitigen Erstarrung der Aufgusslegierung und andererseits zu keinem Durchschmelzen des Substratmaterials kommt. Ziel ist es, dabei möglichst nur die Oberfläche anzuschmelzen, um die Gefügeänderung des Lagermetalls auf einen kleinen Bereich zu begrenzen.

Im Anschluss an das Verbundgießen wird der Verbund durch Walzvorgänge weiterverarbeitet und mit dem Stahlstützkörper mittels Walzplattieren verbunden [12]. Vor dem Verpressen zum fertigen Lager durchläuft der Stahl-Verbund gegebenenfalls noch Wärmebehandlungen sowie teilweise weitere umformtechnische Prozesse.

Maßgebend für einen fehlerfreien Betrieb des Gleitlagers ist die Haftung zwischen den einzelnen Schichten. Während die Überprüfung der Beschichtungen mit Hilfe verschiedenster Verfahren durchgeführt werden kann [13], stößt man bei der Prüfung der Haftfestigkeit zwischen Stahl und Lagermetall sowie Lagermetall und Bindefolie schnell an die Grenzen des momentanen Standes der Technik, insbesondere für eine quantitative Aussage.

Da verschiedenste Gleitlagerprüfverfahren (wie etwa der Gleitlagerprüfstand [14]) zeigen, dass die Schwachstelle meist in der Bindezone zwischen Lagermetall und Bindefolie liegt, soll im Rahmen dieser Arbeit die Haftfestigkeit des gießtechnisch hergestellten Verbundes näher betrachtet werden. Das hierfür verwendete Prüfverfahren soll bereits im Gusszustand nach dem Verbundgießen, Ergebnisse hinsichtlich der

Haftung liefern. Durch eine Prüfung schon am Anfang der Wertschöpfungskette sollen etwaige Fehler detektiert und ausgeschieden werden.

### 2.3. Haftfestigkeitsprüfverfahren

Über die Untersuchung der Haftfestigkeit von walzplattierten Aluminiumverbunden gibt es seitens der Literatur nur wenige Quellen auf die verwiesen werden kann. Während sich Schmidchen et al. [15] im Rahmen des Tagungsbands MEFORM 2004 mit Untersuchungen hinsichtlich der Theorie von Haftfestigkeiten beim Walzplattieren beschäftigt, sind in der Masterarbeit von Salentin [16] einige Verfahren zur prüftechnischen Untersuchung der Haftfestigkeit angeführt.

In Tabelle 1 sind die unterschiedlichen Verfahren hinsichtlich ihres Einsatzbereichs sowie der Normbezeichnungen gegliedert.

Prüfverfahren	Einsatzbereich	Normbezeichnung	Ergebnis
Zugversuch	Materialprüfung Haftfestigkeitsprüfung	DIN EN 13144:2003-09	quantitativ
Chalmers-Test	Prüfung der Haftfestigkeit von Aluminium und Weißmetall Lagerschalen	ISO 4386-2:2012	quantitativ
Zugscherversuch	Prüfung von Verbundstoffen und Klebstoffen	DIN 54451	quantitativ
Druckscherversuch		DIN 50162	quantitativ
Schälprüfung	Prüfung von Klebeverbindungen	DIN EN 1464	quantitativ / qualitativ
Wedge-Test	Prüfung von Klebeverbindungen unter korrosivem Umgebungsmedium	nicht genormt	qualitativ
Stoßversuch	Schnittkraftmessung	nicht genormt	qualitativ
Verwindungstest	Prüfung von Aluminium-Zinn- Vorverbunden	nicht genormt	qualitativ
Zentrifugentest	Dispersionsanalyse Prüfung von Beschichtungen und Klebstoffen	ISO 4624 DIN EN 15870	quantitativ
Ollardtest	Prüfung der Haftfestigkeit	nicht genormt	quantitativ / qualitativ

Tabelle 1) Matrix der Haftfestigkeitsprüfverfahren

Abhängig vom Anwendungsbereich gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen Prüfverfahren mit deren Hilfe sowohl quantitative als auch qualitative Ergebnisse hinsichtlich der Haftfestigkeit erzielt werden können.

### 2.3.1. Zugversuch (adaptiert für Verbundproben)

Beim Zugversuch nach DIN EN 13144:2003-09 wird ein vordefinierter Probenkörper auf Zug belastet bis es zum Versagen der Probe kommt [17]. Mit Hilfe einer angepassten Mess-Software wird der Kraftverlauf detektiert und über die Prüffläche in einen Spannungswert umgerechnet:

$$\sigma = \frac{F_{max}}{A_Z} \quad Gl. 1.1$$

$$A_Z = l_Z \times b_Z \quad Gl. 1.2$$

Die Dehnung der Zugprobe wird über Dehnungsmesser gemessen und in Prozent angegeben. In der graphischen Auswertung wird anschließend die Spannung der Dehnung gegenübergestellt.

Da bei der Prüfung der Verbundproben lediglich der Festigkeitswert bestimmt werden soll, wird hier die Spannung dem Prüfweg gegenübergestellt.

Wie in der Abbildung 5 ersichtlich ist, werden die Proben so eingespannt, dass die Bindezone normal zur Kraftrichtung steht. Auf diese Weise kann ein uniaxialer Spannungszustand erreicht werden [18].

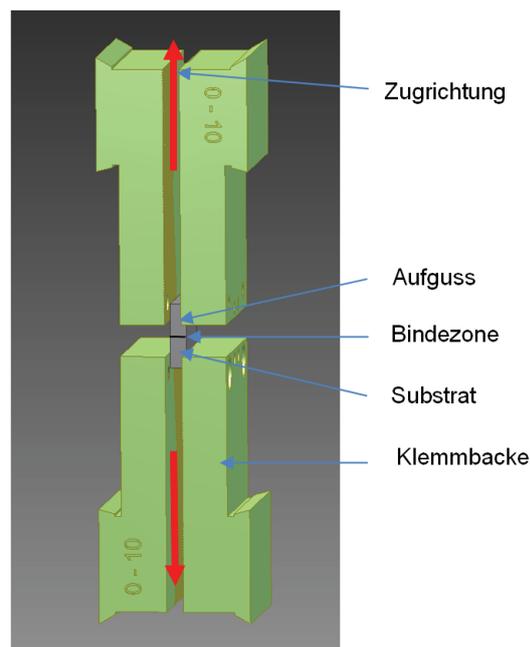


Abbildung 5) Zugversuch (adaptiert für Verbundproben)

Bei verbundgegossenen oder geklebten Proben kann anhand der maximalen Prüfkraft sowie des Bruchverhaltens, eine Aussage über die Haftfestigkeit des Werkstoffes getroffen werden:

#### Versagen in der Bindezone:

Tritt ein Versagen in der Bindezone auf, so entspricht der hier ermittelte Festigkeitswert der Haftfestigkeit. Es ist somit die Haftfestigkeit in der Bindezone kleiner als die Festigkeiten der schwächeren Werkstoffkomponente des Verbundes.

#### Versagen im Werkstoff:

Sollte die Probe in einem der beiden Werkstoffe versagen, so kann der hier ermittelte Festigkeitswert nicht eindeutig als Haftfestigkeitswert nachgewiesen werden. Um eine Aussage über den ermittelten Messwert treffen zu können, ist es notwendig die Materialfestigkeiten sowie mögliche Fehlstellen durch Kerbwirkung oder Materialschäden zu analysieren.

Die Probengeometrie kann bei diesem Versuch variiert werden. Es können sowohl flache als auch runde Proben verwendet werden. Während die flachen Proben über vier Klemmbacken fixiert werden, erfolgt bei den runden Proben die Fixierung über ein Einschraubgewinde an den beiden Enden der Probe.

Da es sich beim Zugversuch um ein universelles Prüfverfahren handelt, sind in der Literatur bereits einige adaptierte Verfahren zur Überprüfung von Materialien, Verbunden oder Schichten zu finden [13][19][44]. Im Rahmen dieser Arbeit musste der Zugversuch dahingehend angepasst werden, dass ein Prüfkörper aus einem Aluminium-Verbundwerkstoff geprüft werden kann.

### **2.3.2. Chalmers-Test**

Beim Chalmers-Test nach ISO 4386-2-2012 wird eine Probe auf einer Zugprüfmaschine mit Hilfe einer Prüfvorrichtung (siehe Abbildung 6) auf Zugbeanspruchung geprüft [20].

Der Test kann nach Norm für Mehrschichtlager mit Lagerlegierungen auf Blei, Zinn, Kupfer oder Aluminiumbasis, mit einer minimalen Schichtdicke von zwei Millimetern, angewendet werden. Des Weiteren ist ein Lagerinnendurchmesser von mindestens 90mm erforderlich, sofern die Proben aus Lagerschalen entnommen werden. Die Prüfung von flachem Vormaterial ist ebenfalls möglich.

Bei diesem Prüfverfahren wirkt die Prüfkraft, wie beim Zugversuch, normal zur Bindezone. Der ermittelte Festigkeitswert in  $\text{N}/\text{mm}^2$  ist der Quotient aus der maximal aufgetragenen Prüfkraft in Newton und der Prüffläche in Quadratmillimeter.

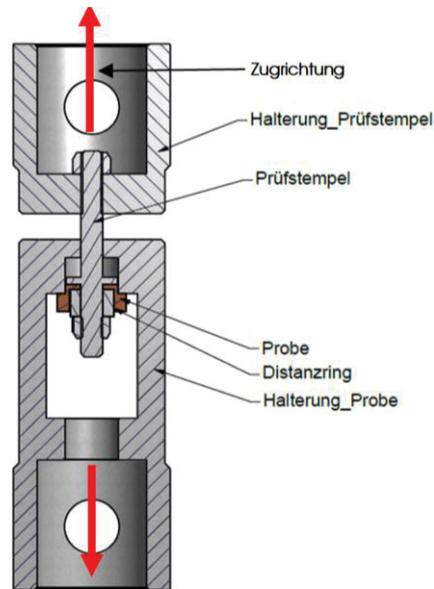


Abbildung 6) Chalmers-Prüfvorrichtung

Abhängig vom Innendurchmesser der Lagerschale, muss hier bei der Probenfertigung auf die in Abbildung 7 angeführten Abmessungen und Toleranzen geachtet werden. Koring beschreibt in seinem Buch „Gleitlager im Wandel“ die Problematik dieses Prüfverfahrens hinsichtlich der Probenfertigung und die daraus folgenden Fehler in der Auswertung [21]. Des Weiteren stellt er fest, dass das erhaltene Ergebnis hinsichtlich seiner Aussagekraft zu analysieren ist.

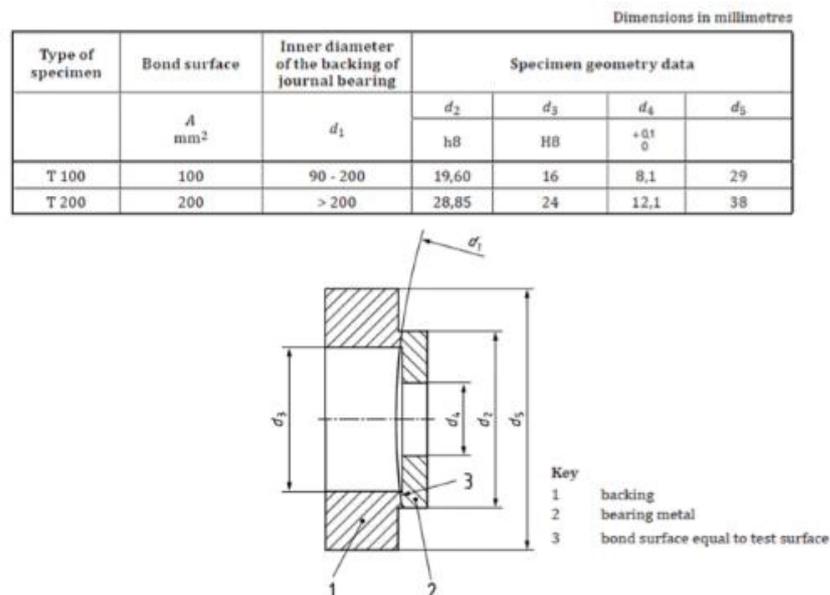


Abbildung 7) Probenfertigung Chalmers-Test [20]

Bei der Prüfung des Probenteils wird mit einem linearen Kraftanstieg von  $10 \text{ N/mm}^2\text{s}$  geprüft.

Die Auswertung der Prüfung erfolgt unter folgenden Richtlinien:

Schichtdicke größer als der charakteristische Grenzwert:

Entspricht die Schichtdicke des Lagermetalls dem charakteristischen Grenzwert oder ist sie größer als dieser, so kann der ermittelte Festigkeitswert als absoluter Haftfestigkeitswert angegeben werden.

Schichtdicke kleiner als der charakteristische Grenzwert:

Ist die Schichtdicke des Lagermetalls kleiner als der charakteristische Grenzwert so erhält man einen relativen Haftfestigkeitswert. Ein absoluter Haftfestigkeitswert kann mit Hilfe von materialspezifischen Auswertungskurven ermittelt werden. Liegen keine Auswertungskurven vor, müssen diese durch Versuche mit verschiedenen Schichtdicken ermittelt werden.

Die so ermittelten Haftfestigkeitswerte dienen zur vergleichenden Untersuchung der Haftfestigkeit verschiedener Prozesse und Legierungen.

Auf Grund der hohen Anforderung hinsichtlich der Probenfertigung (Position der Bindezone) ist dieses Verfahren für die Untersuchung von gießtechnisch hergestellten Aluminiumverbunden nicht zielführend.

### 2.3.3. Zugscherversuch

Beim Zugscherversuch nach DIN 54451 wird eine Verbundprobe hinsichtlich der Scherhaftfestigkeit untersucht [22]. Wie in Abbildung 8 ersichtlich ist, ähnelt der Prüfkörper einer Zugprobe, wobei senkrecht zur Zugrichtung Nuten in das Material gefräst werden. Die Nuten werden beidseitig bis zur Bindezone durchgeführt. Somit kann sichergestellt werden, dass ein reines Scherverhalten der Bindezone überprüft wird.

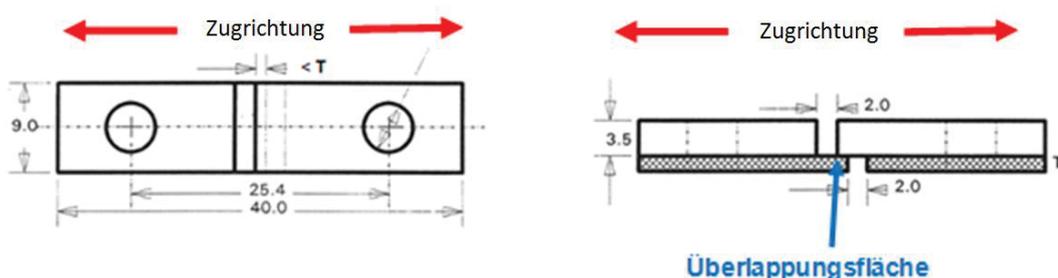


Abbildung 8) Zugscherprobe

Da die eingearbeiteten Nuten eine Kerbwirkung hervorrufen, kann es bei zu großer Überlappungsfläche zu einem Versagen in einem der beiden Materialien kommen. Aus diesem Grund muss je nach Material und Versuch die Überlappungsfläche angepasst werden [23].

Die bei der Prüfung entstehenden Scherkräfte in der Bindezone führen zum Versagen der Probe. Anhand der notwendigen Kraft die für das Abscheren notwendig ist, kann die Scherhaftfestigkeit  $[N/mm^2]$  über die Stegfläche berechnet werden:

$$\tau = \frac{F_{max}}{A_{SZ}} \quad \text{Gl. 2.1}$$

$$A_{SZ} = \ddot{U} \times b_{SZ} \quad \text{Gl. 2.2}$$

Im Rahmen der Dissertation von Wimmer konnten bereits Ergebnisse hinsichtlich der Haftfestigkeit von verbundgegossenen Aluminium-Werkstoffen erzielt werden [23].

### 2.3.4. Druckscherversuch

Ähnlich wie beim Zugscherversuch wird beim Druckscherversuch nach DIN 50162 eine Verbundprobe hinsichtlich der Scherhaftfestigkeit untersucht [24]. Wie in Abbildung 9 ersichtlich ist, besteht der Prüfkörper aus dem Substratmaterial und einem schmalen Steg des Aufgusswerkstoffs (in diesem Fall der Aufgusslegierung).

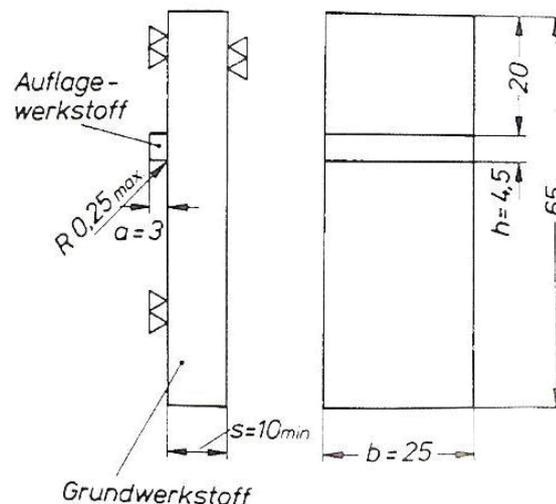
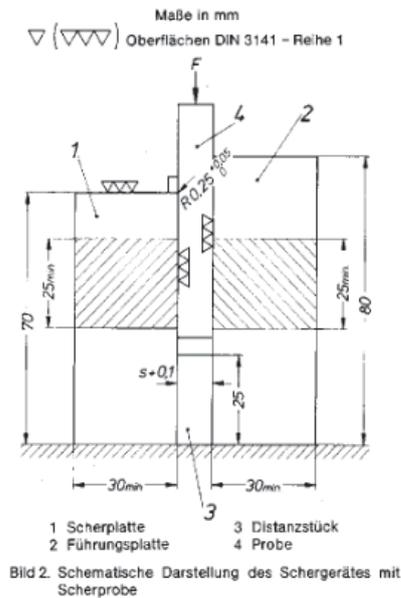


Abbildung 9) Scherprobe [24]

Bei dieser Versuchsdurchführung wird sowohl das Schergerät als auch die Scherprobe so eingesetzt, dass die Längsachse der Probe ident mit der Prüfrichtung ist. Anschließend wird die Probe mit einer definierten Kraftzunahme bis zum Abscheren belastet. Dabei

wird die Höchstkraft gemessen. Über die Fläche des schmalen Stegs kann dann die Scherfestigkeit  $[N/mm^2]$  ermittelt werden.



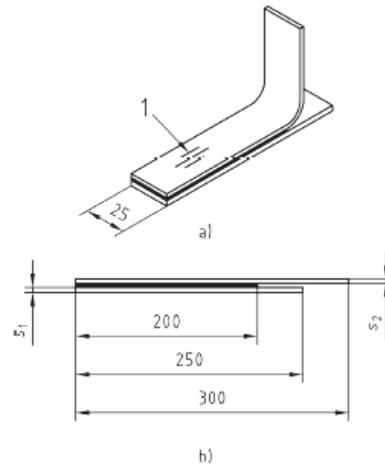
**Abbildung 10) Versuchsdurchführung [24]**

Ist die Bindung zwischen den Materialien höher als die Festigkeit des Materials kann es zum Abscheren des Auflagewerkstoffes kommen. Um die plastische Verformung des Materials zu minimieren, muss die Führung der Probe in der Scherplatte entsprechend der Toleranzen gefertigt sein.

Im Rahmen der Untersuchung von walzplattierten Weißmetall-Stahl-Verbunden in der Miba Gleitlager GmbH konnte festgestellt werden, dass es bei der Druckscherprüfung bei Raumtemperatur zu einem Schneiden des Werkstoffs kommt. Eine Haftfestigkeitsprüfung zwischen Weißmetall und Stahl konnte nur bei einer Prüfung in flüssigem Stickstoff durchgeführt werden [16].

### 2.3.5. Schälprüfung

Ein weiteres Verfahren zur Prüfung der Haftfestigkeit ist die Schälprüfung. Bei der Schälprüfung wird die Verbundprobe an einer Seite getrennt, sodass Substrat und Bindefolie/Aufgussmaterial separat eingespannt werden können. Nach dem Einspannen wird an beiden Komponenten angezogen. Die hier einwirkende Kraft steht normal zur Bindezone. Anhand eines Kraft-Weg-Diagramms kann im Rahmen der Auswertung die Haftfestigkeit analysiert werden.



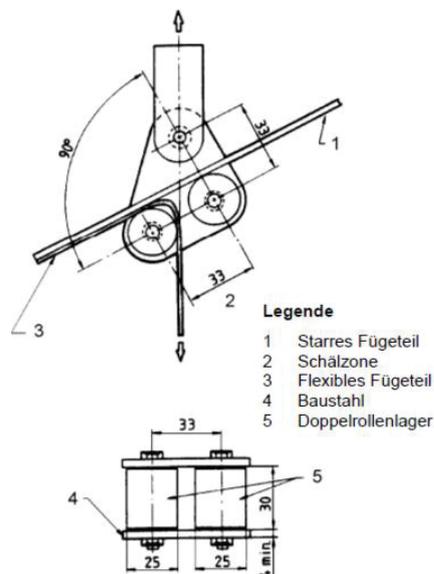
**Legende**

- a) angewinkelt
- b) nicht angewinkelt
- 1 Bewegungsrichtung der Rollen
- $s_1$  Dicke des starren Fügeiteils
- $s_2$  Dicke des flexiblen Fügeiteils

**Abbildung 11) Probengeometrie des Schälversuchs [26]**

Während beim Winkelschälversuch nach Habenicht [25] die beiden Materialien in gleicher Dicke vorliegen, wird beim Rollenschälverfahren nach DIN EN1464 [26] ein dünnes Blech abgeschält.

Bei diesem Versuch wird die gegenüberliegende Seite der Probe zur Prüfung zwischen zwei Klemmbacken eingespannt. Über Umlenkrollen werden, wie in Abbildung 12 ersichtlich ist, das Substrat und die Bindefolie getrennt.



**Legende**

- 1 Starres Fügeiteil
- 2 Schälzone
- 3 Flexibles Fügeiteil
- 4 Baustahl
- 5 Doppelrollenlager

**Abbildung 12) Halterung zur Auflagerung der Proben für Rollenschälprüfung [26]**

Die bei dieser Prüfung auftretenden Kräfte korrelieren mit der Haftfestigkeit der Probe.

Mit Hilfe dieses Verfahrens können Klebungen sowie plattierte metallische Verbunde hinsichtlich ihrer Haftfestigkeit untersucht werden.

Sowohl beim Winkelschälverfahren als auch beim Rollenschälverfahren spielen das Dickenverhältnis und die Materialeigenschaften eine bedeutende Rolle. Erlauben die Werkstoffe keine plastische Verformung, beziehungsweise ist ihr Materialverhalten zu spröde, so ist es nicht möglich, die Enden in die Prüfvorrichtung einzuspannen, da es bereits beim Umformen zu einem Spröbruch kommen kann. Des Weiteren ist bei zu geringer Foliendicke mit einem Versagen der Folie zu rechnen. Bei einer zu großen Gesamtdicke ist ein Einbau in die Prüfvorrichtung nicht mehr möglich.

### 2.3.6. Wedge-Test

Der Wedge-Test ist ein Prüfverfahren zur Prüfung der Haltbarkeit von adhäsiven Verbindungen [27]. Bei diesem Test wird, wie in Abbildung 13 dargestellt, ein Keil zwischen die Verbundschichten eingedrückt und die notwendige Kraft zum Trennen gemessen. Anschließend wird der initiierte Riss durch ein korrosives Umgebungsmedium auf seine Langzeitfestigkeit untersucht.

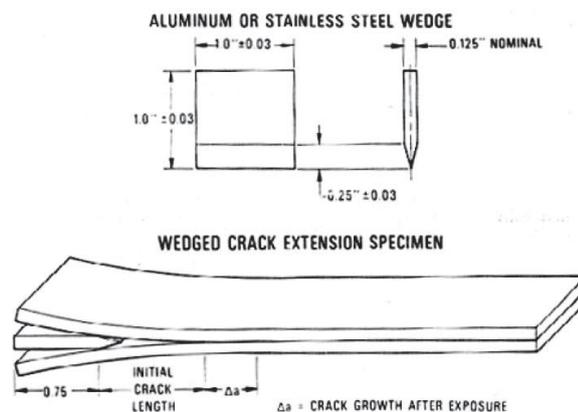


Abbildung 13) Wedge-Test [29]

Bei diesem Verfahren sind Referenzwerte zu guten beziehungsweise schlechten Proben notwendig, da der hier ermittelte Wert zwar quantitativ, der Bezug zur Haftung jedoch nur qualitativ ist. Des Weiteren ist eine makroskopische Untersuchung des Risses notwendig, um die Anhaftung des Aufgussmaterials zu verifizieren.

Die wesentlichen Parameter, die das Ergebnis des Wedge-Test beeinflussen sind die Geometrie des Prüfkeils, die Eindringgeschwindigkeit, sowie die Positionierung des Prüfkeils [29]. Während die ersten beiden Parameter bereits vor der Prüfung festgelegt werden, muss die Positionierung des Prüfkeils vor jedem Versuch überprüft werden. Wichtig ist hierbei, dass die Schneide des Keils entlang der Bindezone ausgerichtet ist. Dadurch soll sichergestellt werden, dass nicht die Materialfestigkeit, sondern die Haftfestigkeit geprüft wird.

### 2.3.7. Stoßversuch

Der Stoßversuch beruht auf den Prinzipien unterschiedlicher Schnittkräfte bei der spanenden Bearbeitung von Metallen [30]. Bei dieser Prüfmethode wird ein Probekörper mit Hilfe eines Meißels, schichtweise abgetragen (siehe Abbildung 14 und 15). Dabei wird die notwendige Schnittkraft mittels Kraftmessdose oder indirekt über Dehnmessstreifen (DMS) am Meißel gemessen.



Abbildung 14) Stoßversuch [39]

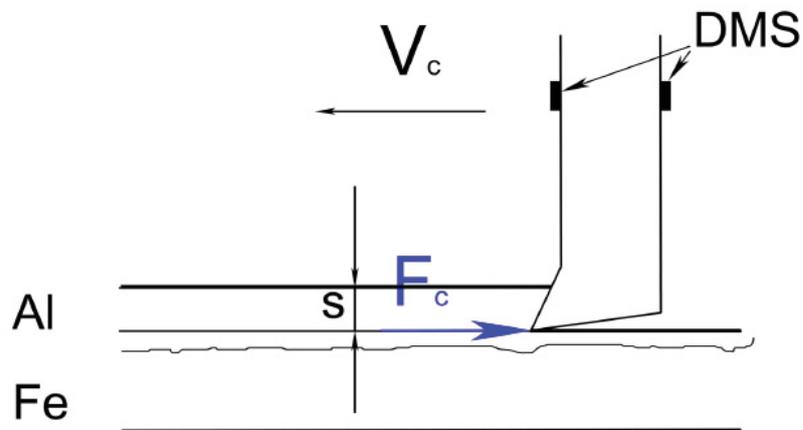


Abbildung 15) Messprinzip des Stoßversuchs [31]

Bei gleichbleibender Spandicke wird ein Kraftverlauf ( $F_C$ ) vom Aufgussmaterial bis zum Substrat mit Hilfe von Dehnmessstreifen (DMS) aufgezeichnet. Anhand dieses Kraftverlaufs kann einerseits die Homogenität der Werkstoffe, sowie die Qualität der Bindezone betrachtet werden.

Dieses Verfahren ist bis jetzt hinsichtlich seiner prüftechnischen Eignung im Rahmen einer Untersuchung an der Bundeslehranstalt für Materialforschung und Prüfung in Kooperation mit der Firma Miba Gleitlager GmbH analysiert worden und beruht rein auf spanungstechnischen Grundlagen [31].

### 2.3.8. Verwindungstest

Beim Verwindungstest handelt es sich um eine qualitative Haftungsprüfung von plattierten Stahl-Leichtmetall-Verbundmaterialien [32]. Bei diesem Test wird die Probe in der Prüfmaschine auf Torsion beansprucht und somit eine Scherbelastung in der Bindezone initiiert.

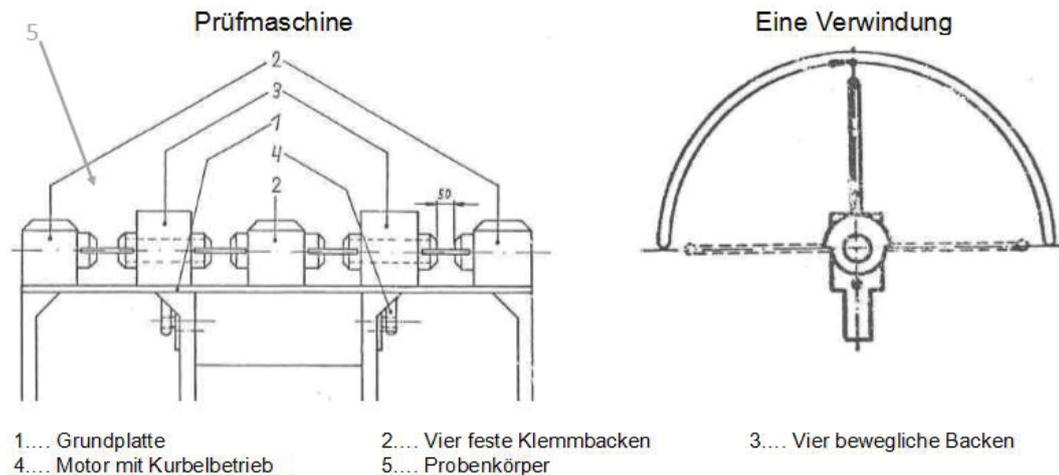


Abbildung 16) Verwindungstest [32]

Bei einer Verwindung wird die Probe um 90 Grad nach rechts und links (Normal zur Längsachse) und anschließend wieder in die Ruhelage gedreht.

Bei der Prüfung werden im ersten Durchgang 20 Verwindungen aufgebracht. Anschließend erfolgt eine optische Analyse der Probe. Sind keine Ablösungen oder Einrisse zu sehen, so werden weitere zehn Verwindungen durchgeführt. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis die ersten Fehler auftreten oder eine Verwindungsanzahl von 50 Verwindungen erreicht ist.

Ausgewertet wird dieser Test einerseits durch die Dokumentation der Anzahl der ertragbaren Verwindungen als auch durch die optische Analyse des Rissbildes.

Ist die Risslänge in der Bindezone größer als fünf Millimeter oder liegen mehrere nicht durchgehende Risse mit einer Gesamtlänge größer als zehn Millimetern vor, so wird die Haftung als nicht ausreichend gewertet. Ansonsten liegt ein positives Ergebnis vor.

Ist kein eindeutiges Ergebnis erkennbar, so müssen weiterführende Untersuchungen durchgeführt werden.

### 2.3.9. Zentrifugentest

Der Zentrifugentest ist ähnlich einer Standardzugprüfung, wobei hier die Zugkraft über die Zentrifugalkraft aufgebracht wird [33][34]. Der Probenkörper wird, wie in Abbildung 17 ersichtlich ist, mit dem Prüfkörper verklebt. Anschließend wird die Probe mit einem Gewicht in einer Zentrifuge verschraubt.

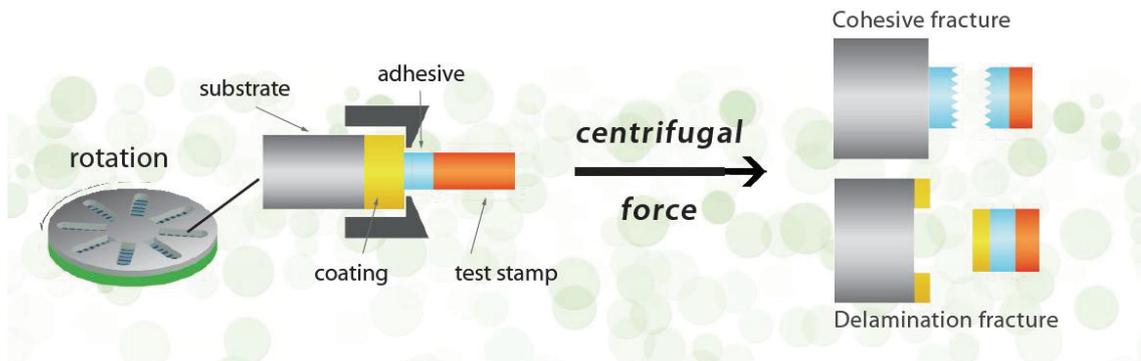


Abbildung 17) Zentrifugentest [35]

Die Zentrifuge wird kontinuierlich auf eine maximale Umdrehungsanzahl von 13.000 Umdrehungen pro Minute gebracht. Die dabei auftretende Zentrifugalkraft wirkt normal zur Prüffläche und führt bei Festigkeiten unter 80MPa im Verlauf der Prüfung zum Versagen.

Durch das Versagen löst das Gewicht einen Infrarotsensor aus, der die Umdrehungsgeschwindigkeit detektiert.

Ausgehen von der Rotordrehzahl, der Prüfstempelmasse, der Prüffläche, sowie des Abstands des Probenschwerpunktes von der Rotationsachse, errechnet die Maschine die vorliegenden Festigkeiten. Hierbei wird folgender Rechengang angewandt:

$$F_c = m_c \times \omega^2 \times r_c \quad \text{Gl. 3.1}$$

$$\sigma = \frac{F_c}{A_c} \quad \text{Gl. 3.2}$$

$$A_c = r^2 \times \pi \quad \text{Gl. 3.3}$$

Bei diesem Verfahren kann die Lastaufbringung variiert werden. Einerseits ist ein linearer Kraftanstieg möglich, andererseits kann auch die Rotationsgeschwindigkeit linear gesteigert werden. Bei längeren Prüfdauern kann bei diesem Prüfverfahren auch eine zyklische Belastung aufgebracht werden.

Nach dem Prüfvorgang muss die Probe und der Prüfstempel makroskopisch untersucht werden, um die Bruchstelle hinsichtlich der Bruchart zu differenzieren. Hierbei unterscheidet man bei Klebungen zwischen Adhäsions-, Kohäsions- oder Mischbruch.

Für die Unterscheidung der Bruchart bei Gussteilen gibt es noch keine Klassifizierung.

### 2.3.10. Ollard-Test

In der Literatur von Nasser wird auf den Ollard-Test als Messmethode zur Prüfung von metallischen Schichten verwiesen [13]. Der Test wurde 1925 entwickelt und 1949 von Knapp modifiziert [36]. Im Rahmen der Literaturrecherche konnte in Österreich keine weiterführende Literatur zum Test gefunden werden. Bei der anschließenden Internetrecherche konnten die in Abbildung 18 dargestellte Versuchsbeschreibung gefunden werden.

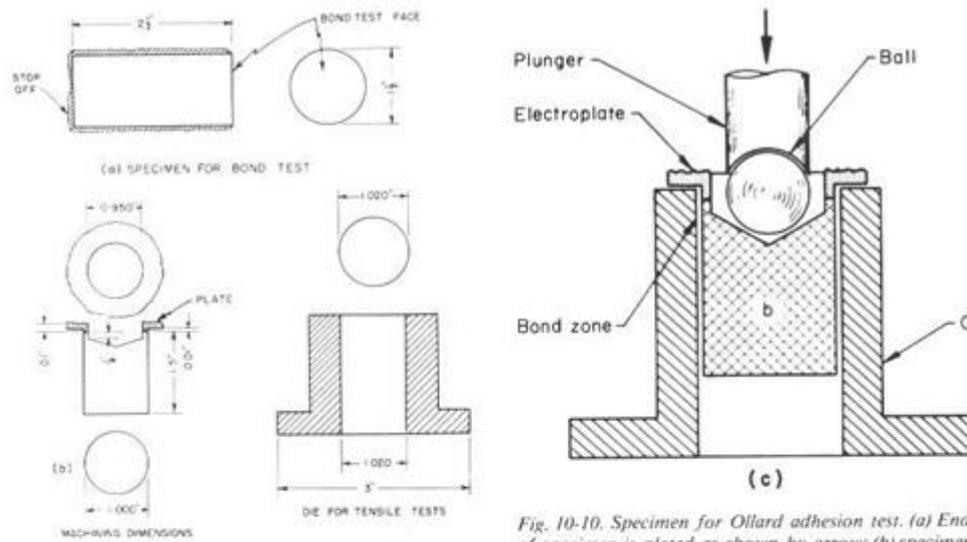


Fig. 10-10. Specimen for Ollard adhesion test. (a) End of specimen is plated as shown by arrow; (b) specimen

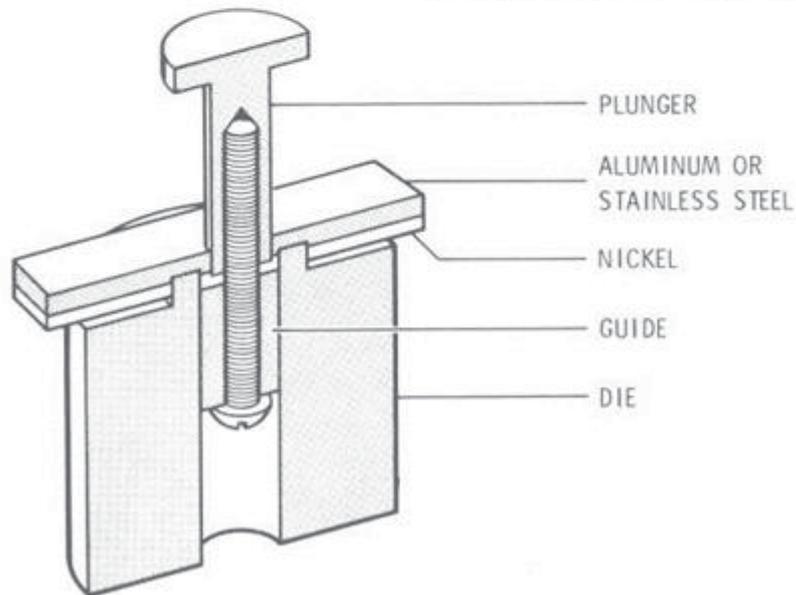


Fig. 9. Modified Ollard test setup.

Abbildung 18) Ollard Test [36]

Auf Grund der Tatsache, dass keine Primärliteratur zu finden war, wurde der Entschluss gefasst, dieses Prüfverfahren nicht näher zu betrachten.

### 3. Versuchsmethodik

#### 3.1. Vormaterialherstellung

Das in dieser Arbeit untersuchte Probenmaterial wurde einerseits an einer Laborgießanlage der Firma Miba Gleitlager GmbH, andererseits an einer Labor-Strang-Gießanlage des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg) der Technischen Universität München hergestellt.

Die Proben wurden aus Verbunden von Aluminium-Zinnlegierungen mit Rein-Aluminium sowie Verbunden aus Aluminium-Zinnlegierungen mit Aluminium-Kupfer-Mangan-Legierungen hergestellt. Die genaue Dokumentation der Probenentnahme ist in den Tabellen im Anhang A ersichtlich.

#### Laborgießanlage Miba Gleitlager GmbH

Bei der in Abbildung 19 und 20 gezeigten Anlage handelt es sich um eine Versuchsanlage bei der auf eine sich bewegende Substratplatte eine Aluminium-Legierung aufgegossen wird.

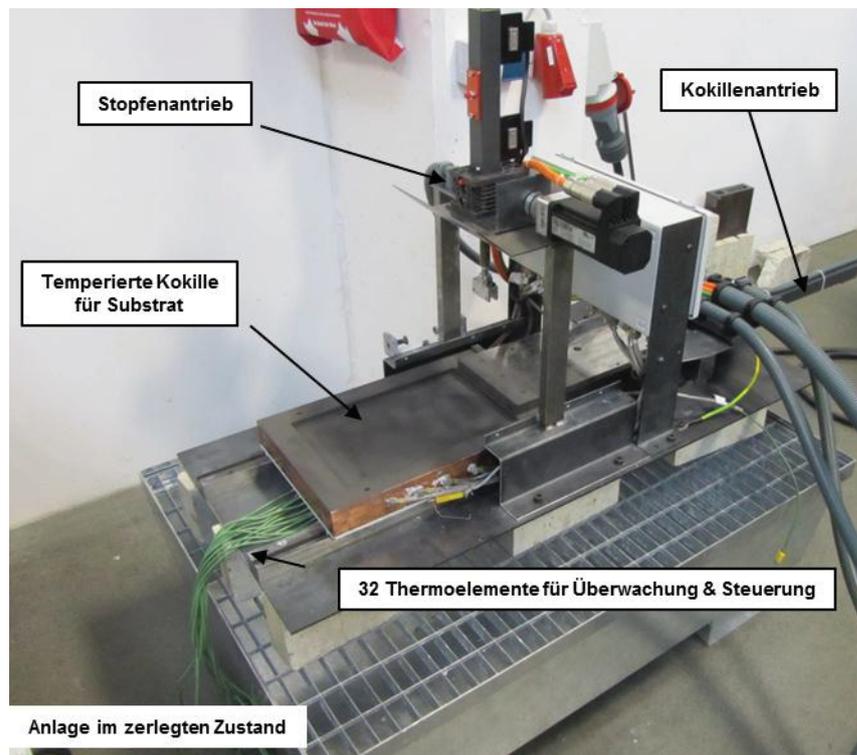


Abbildung 19) Verbundgießanlage Miba Gleitlager GmbH GmbH [37]

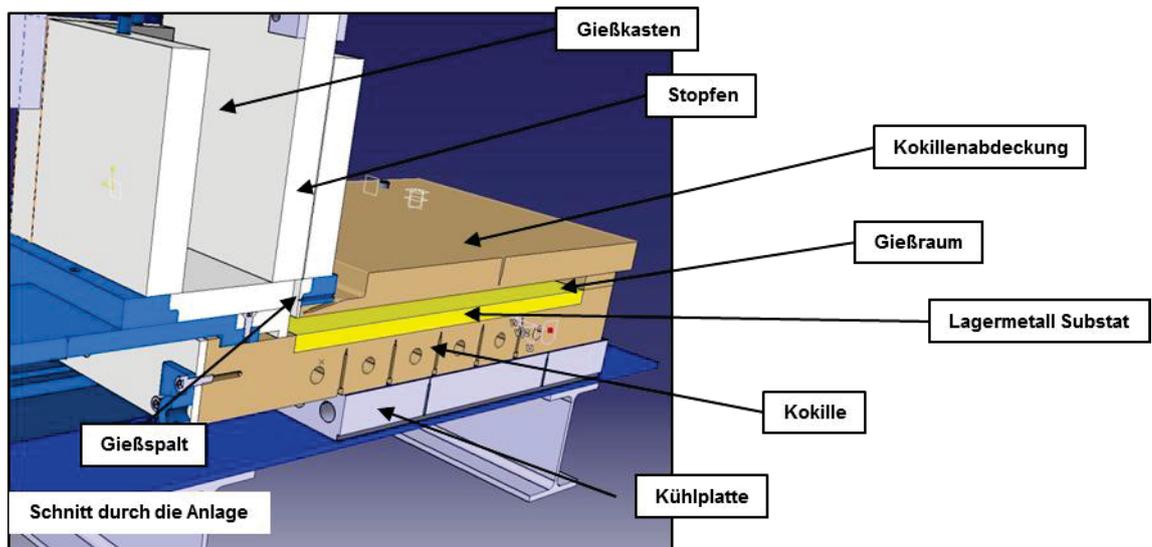


Abbildung 20) Aufbau der Verbundgießanlage Miba Gleitlager GmbH [37]

Die Anlage erlaubt es, die Substrattemperatur, Schmelztemperatur sowie die Vorschubgeschwindigkeit zu variieren. Die Aufgussdicke der Legierung kann zwischen 6 und 12mm eingestellt werden.

Anders als bei der utg-Anlage wird hier das Substrat separat an einem Beltcaster gegossen, anschließend zugeschnitten und in die Kokille eingelegt. In der Kokille wird das Substrat auf Prozesstemperatur aufgewärmt. Nach dem Start des Prozesses wird die flüssige Aluminiumlegierung, mittels des gezeigten Gießsystems (Abbildung 20), auf das Substrat aufgegossen.

Die Probengröße entspricht, wie in Abbildung 21 ersichtlich ist, in etwa jener eines DIN A4 Blattes.



Abbildung 21) Gussstreifen VGM88

Die Gießoberfläche wird zur Weiterverarbeitung bei diesen Proben noch frästechnisch bearbeitet, bevor der Verbund weiter umgeformt wird. Dieser Bearbeitungsschritt dient dazu, dass notwendige Dickenverhältnis zwischen Aufgusslegierung und Substrat herzustellen.

## Verbundgussanlage utg

Die Abbildungen 22 und 23 zeigen die Verbundgussanlage des utg.

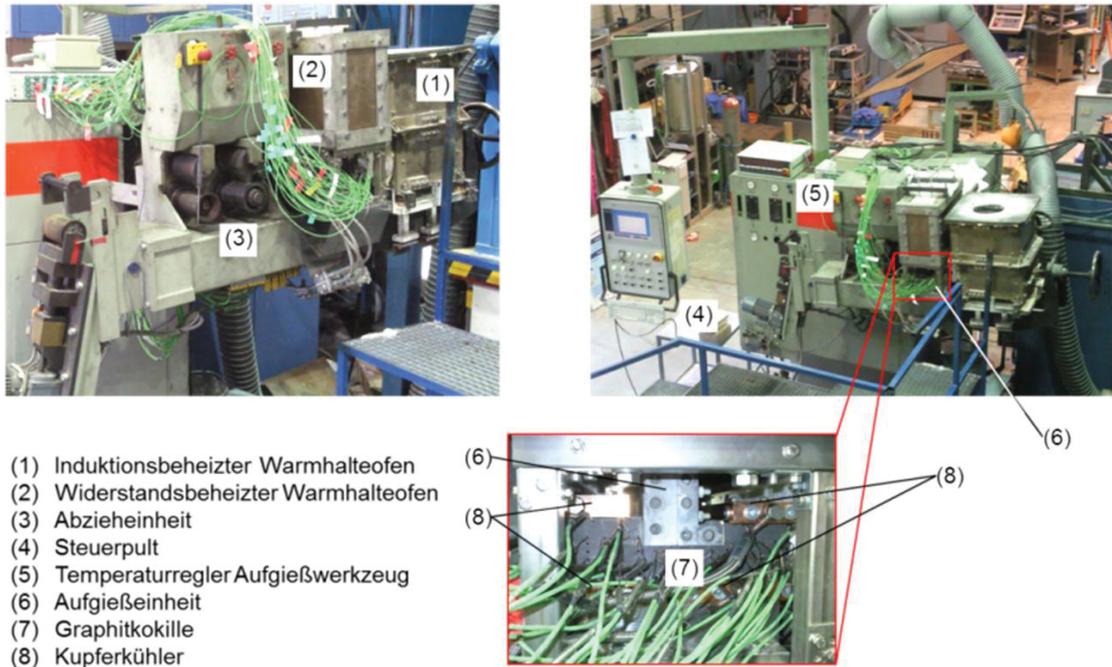


Abbildung 22) Aufbau utg-Anlage [38]

Bei dieser Anlage wird in einem ersten Schritt das Substrat mittels horizontalem Strangguss gegossen. Noch während der Abkühlung des Substratmaterials wird über eine Aufgießeinheit die Aufgusslegierung aufgebracht. Wie bei der Laborgießanlage der Miba Gleitlager GmbH können auch hier verschiedene Parameter wie Gießgeschwindigkeit, Abzugskinetik, Substrattemperatur sowie Schmelzetemperatur variiert werden.

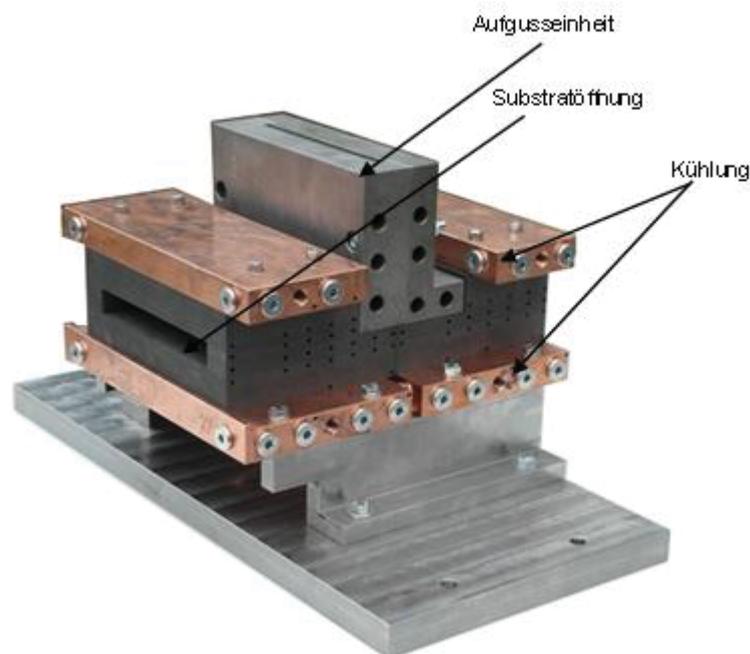


Abbildung 23) Aufgusseinheit utg-Anlage [38]

An der utg-Anlage können, wie in Abbildung 24 ersichtlich ist, Streifen mit einer Länge von mehreren Metern bei stationären Gießbedingungen gegossen werden.



**Abbildung 24) Gussprodukt utg-Anlage [38]**

Während bei der utg-Anlage Streifen in größerer Länge mit weitgehend homogenen Haftfestigkeiten gegossen werden können, dient das Verbundgussmodul der Miba Gleitlager GmbH in erster Linie zur Variation der Legierungen. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass auf Grund der kleinen Menge, die vergossen wird, der Bereich mit einer homogenen Haftfestigkeit relativ begrenzt ist.

### **3.2. Metallographische Charakterisierung**

Die Untersuchung der Gussprodukte umfasste einerseits eine chemische Untersuchung des Substratmaterials, andererseits eine Untersuchung der Aufgusslegierung vor dem Abguss. Darüber hinaus wurden stichprobenartig metallographische Schliffe erstellt und hinsichtlich der Qualität des Substratmaterials, der Aufgusslegierung, sowie der Bindezone Untersuchungen durchgeführt. Die Ergebnisse aus diesen Untersuchungen fließen jedoch nicht in diese Arbeit ein.

### **3.3. Charakterisierung des Ausgangsmaterials**

Im Rahmen der Charakterisierung des Ausgangsmaterials wurden an der Materialprüfmaschine Untersuchungen des Ausgangsmaterials durchgeführt.

Hierbei wurden mit Hilfe verkleinerter Norm-Zugproben die Materialkennwerte des Substrat- sowie des Aufgussmaterials bestimmt. Das Hauptaugenmerk lag hier auf den Werten der Zugfestigkeit.

### 3.4. Zugprüfung

#### 3.4.1. Berechnung und Konstruktion

Auf Grund der Tatsache, dass die Geometrie des Probenmaterials mit einer maximalen Höhe von 24mm kleiner als der kleinste Norm-Prüfkörper laut DIN EN 13144:2003-09 ist, musste eine neue Probeneinspannung konstruiert werden. Hierbei wurden, wie in Abbildung 25 ersichtlich ist, die vier Prüfbacken in Prüfrichtung um mehrere Zentimeter verlängert und mit Schrauben zur Einspannung der Probe versehen.

Um ein Abrutschen der Probe zu verhindern, wurden die notwendige Klemmkraft sowie das daraus resultierende Anzugsmoment der Schrauben berechnet:

$$F_{max} = \sigma \times A_Z \quad \text{Gl. 4.1}$$

$$F_{Klemm} = \frac{F_{max}}{\mu_1 \times z} \quad \text{Gl. 4.2}$$

$$M_A = F_{Klemm} \times \left( \frac{d_2}{2} \times \tan(\alpha + \rho^*) + \frac{d_m}{2} \times \mu_k \right) \quad \text{Gl. 4.3}$$

	Parameter				Einheit
	Glatte Oberfläche		Raue Oberfläche		
<b>b<sub>Z</sub></b>	2	5	2	5	mm
<b>l<sub>Z</sub></b>	30	30	30	30	mm
<b>σ</b>	65	65	65	65	MPa
<b>μ<sub>1</sub></b>	0,2	0,2	0,9 <sup>1</sup>	0,9 <sup>1</sup>	-
<b>z</b>	2	2	2	2	-
<b>d<sub>2</sub></b>	5,35	5,35	5,35	5,35	mm
<b>α</b>	3,4	3,4	3,4	3,4	°
<b>ρ*</b>	9,18	9,18	9,18	9,18	°
<b>d<sub>m</sub></b>	16,6	16,6	16,6	16,6	mm
<b>μ<sub>k</sub></b>	0,12	0,12	0,12	0,12	-

<sup>1</sup> empirisch ermittelter Wert

Tabelle 2) Parameter Klemmbackenberechnung

	Ergebnisse				Einheit
	Glatte Oberfläche		Raue Oberfläche		
<b>A<sub>Z</sub></b>	60	150	60	150	mm <sup>2</sup>
<b>F<sub>max</sub></b>	3900	9750	3900	9750	N
<b>F<sub>Klemm</sub></b>	9750	24375	2167	5417	N
<b>M<sub>A</sub></b>	<b>15,5</b>	<b>38,8</b>	<b>3,5</b>	<b>8,6</b>	<b>Nm</b>

Tabelle 3) Ergebnisse Klemmbackenberechnung

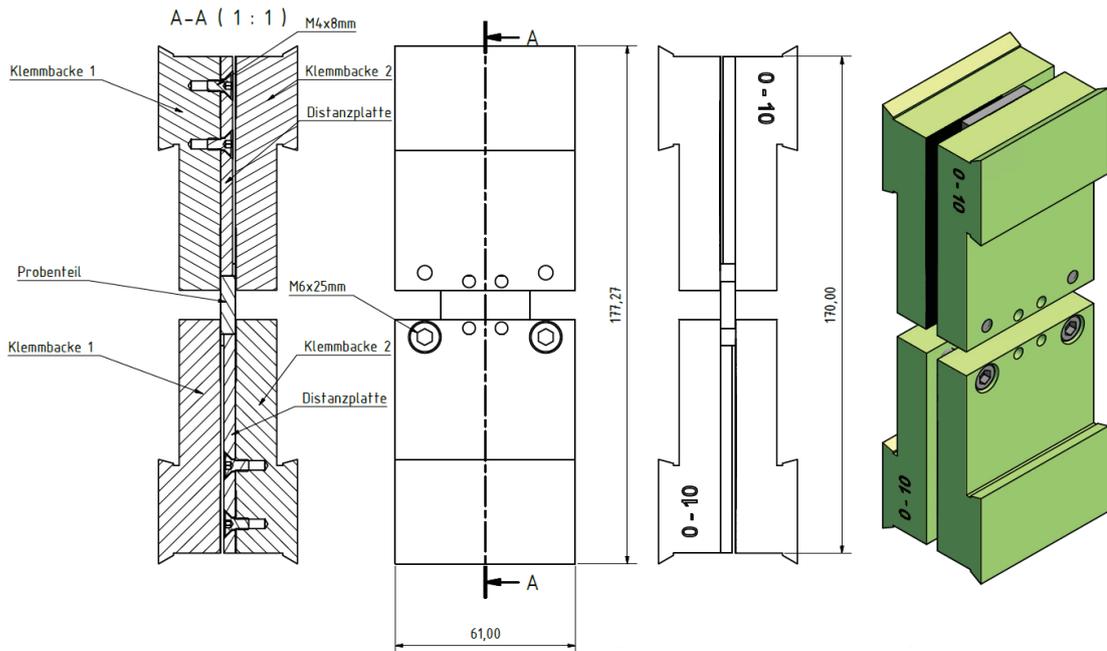


Abbildung 25) Zugvorrichtung

Die Berechnungen der Klemmbacken zeigen, dass das Anzugsmoment bei den glatten Klemmbacken sehr groß ist und daher ein Versagen der Schrauben bzw. eine Vorbelastung des Probenmaterials zu erwarten ist. Aus diesem Grund wurden die Oberflächen der Klemmbacken frästechnisch aufgeraut.

### 3.4.2. Probengeometrie

Die Probengeometrie ist in Tabelle 4 sowie Abbildung 26 dokumentiert.

Probengeometrie		
Beschreibung	Wert	Einheit
Länge	30	mm
Breite	11,6 bis 24	mm
Dicke	2 bis 5	mm

Tabelle 4) Probengeometrie Zugversuch

Alle Proben wurden normal zur Bindezone entnommen, wobei die Probenherstellung sowohl an einer Erodieranlage als auch an einer Fräsmaschine durchgeführt wurde.

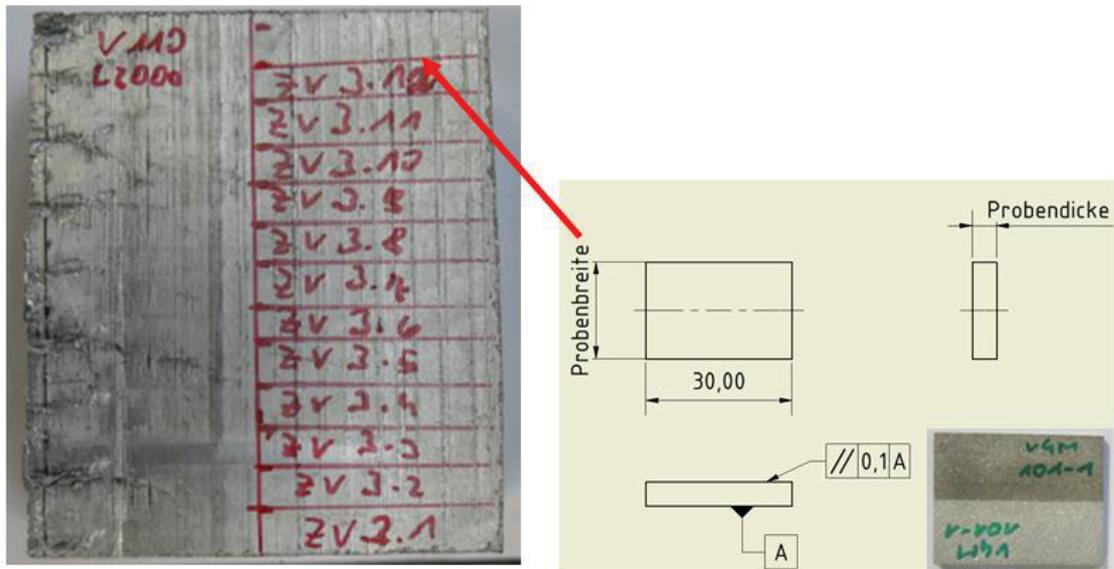


Abbildung 26) Probenentnahme und Probengeometrie

### 3.4.3. Prüfparameter

Die Zugprüfung der Proben wurde an einer 100kN Universalprüfmaschine der Firma Zwick GmbH & Co. KG durchgeführt. Für die Einspannung der Probenaufnahme ist eine Standard Feder-Spannvorrichtung für Zugversuche verwendet worden.

Für das Prüfverfahren wurden folgende Prüfparameter ausgewählt:

Prüfparameter		
Beschreibung	Wert	Einheit
Geschwindigkeit	5	mm/min
Einspanntiefe	2,5 bis 8	mm
Einspannfläche pro Klemmbacke	75 bis 240	mm <sup>2</sup>
Prüffläche	60 bis 150	mm <sup>2</sup>
Vorlast	200	N
Beschreibung	Material	Position
Probenpositionierung	Substrat	unten
	Aufguss	oben

Tabelle 5) Prüfparameter Zugversuch

Die Aufzeichnung und Auswertung des Messsignals erfolgte mit Hilfe der Software Zwick TestXpert II.

Bei einem Rückgang der Prüfkraft unter 20% des Maximalwerts wurde die Prüfung beendet.

### 3.5. Zentrifugenprüfung

#### 3.5.1. Berechnung

Um sicher zu stellen, dass der Versuch für die in dieser Arbeit betrachteten Proben durchführbar ist, mussten in einem ersten Schritt die notwendige Rotationsgeschwindigkeit sowie das Gewicht der Prüfmasse ermittelt werden.

Hierfür wurde von einer maximalen Haftfestigkeit von 70MPa ausgegangen.

$$A_C = r_k^2 \times \pi \quad \text{Gl. 3.3}$$

$$\sigma = \frac{F_C}{A_C} \quad \text{Gl. 3.2}$$

$$F_C = \sigma \times A_C \quad \text{Gl. 5.1}$$

$$F_C = m_C \times \omega^2 \times r_C \quad \text{Gl. 3.1}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{F_C}{m \times r_C}} \quad \text{Gl. 5.2}$$

$$n = \frac{\omega}{2 \times \pi} \quad \text{Gl. 5.3}$$

Parameter		
Beschreibung	Wert	Einheit
$r_k$	5	mm
$A_C$	78,5	mm <sup>2</sup>
$\sigma$	70	MPa
$r_k$	60	mm
$m$	35,5	g

Tabelle 6) Parameter Berechnungen Zentrifugentest

Ergebnisse		
Beschreibung	Wert	Einheit
$F_C$	5498	N
$\omega$	1607	s <sup>-1</sup>
$n$	256	U/s
	15348	U/min

Tabelle 7) Ergebnisse Berechnungen Zentrifugentest

Die oben angeführten Berechnungen ergaben eine notwendige Umdrehungsanzahl von mehr als 15.000 Umdrehungen pro Minute (vgl. Tabelle 6 und 7). Da laut Spezifikation nur rund 13.000 Umdrehungen pro Minute möglich sind, wurde mit dem Anlagenhersteller über eine Erhöhung der Umdrehungsgeschwindigkeit diskutiert. Laut LUM GmbH ist die Umdrehungsanzahl auf 13.000 Umdrehungen begrenzt, um eine entsprechende Lebensdauer der Signalaufnehmer zu erreichen. Sollte sich im Rahmen der ersten Versuche herausstellen, dass die Umdrehungsanzahl nicht ausreichen sollte, so kann diese bis 15.000 Umdrehungen erhöht werden [39].

### 3.5.2. Probengeometrie

Auf Grund der hohen Haftfestigkeit ist eine Klebung der Proben mit dem Prüfstempel nicht durchführbar. Daher musste die Geometrie der Prüfstempel auf das Probenmaterial übertragen werden.

Hierbei wurde die Vorlage eines Prüfstempels mit einer Prüffläche von  $78,5\text{mm}^2$  verwendet. Dies entspricht einem Durchmesser von 10mm.

Im ersten Fertigungsschritt wurde die Probe auf die Enddicke abgefräst. Die in Abbildung 27 sowie Tabelle 8 ersichtliche Probengeometrie wurde mit Hilfe einer Drehmaschine hergestellt. Hierbei wurde der Prüfling zuerst auf den Durchmesser der Aufgusslegierung abgedreht und anschließend vom Substrat her weiterbearbeitet.

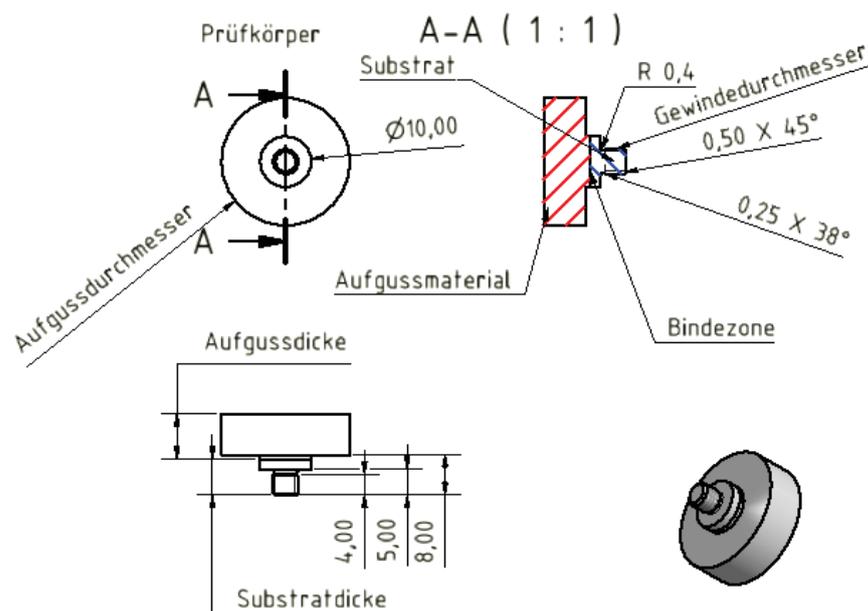


Abbildung 27) Probengeometrie Zentrifugentest

Probengeometrie		
Beschreibung	Wert	Einheit
Durchmesser Aufgusslegierung	20 bis 30	mm
Gewindedurchmesser	M5 / M8	-
Dicke Aufgusslegierung	größer 2	mm
Dicke Substratmaterial	8	mm

Tabelle 8) Parameter Probengeometrie Zentrifugentest

### 3.5.3. Prüfparameter

Die Materialprüfung wurde an einem Gerät vom Typ LUMiFrac der Firma LUM GmbH durchgeführt und mit der zugehörigen Software ausgewertet. Hierbei wurden die in Tabelle 9 angeführten Parameter verwendet.

Die gefrästen Proben wurden, wie in Abbildung 28 ersichtlich ist, vor der Prüfung mit dem Kupfer-Massekörper verschraubt und die Führungshülse aufgesetzt.

Prüfparameter		
Beschreibung	Wert	Einheit
Kraftanstieg	linear	N/s
	8 bis 175	
Prüfmasse	35,47	g
Temperatur	Raumtemperatur	°C

Tabelle 9) Prüfparameter Zentrifugentest

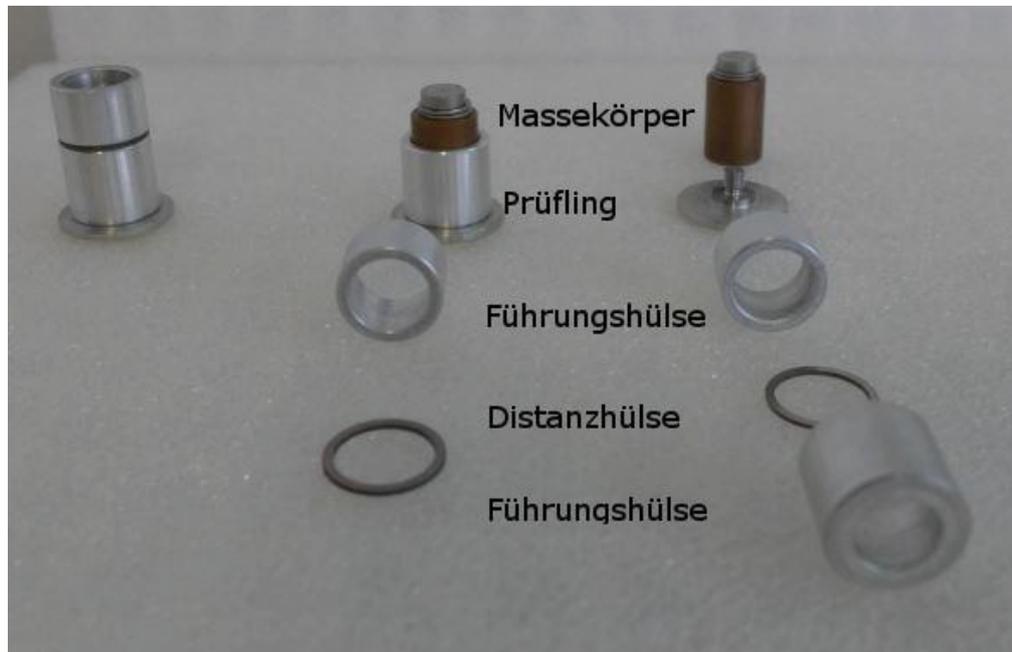


Abbildung 28) Prüfungsaufbau Zentrifugentest [40]

Um eine Unwucht der Anlage zu vermeiden, musste pro Versuchsdurchlauf immer eine gerade Anzahl an Proben geprüft werden. War dies nicht möglich, so wurde ein „Prüfdummy“ eingesetzt.

Beim Probeneinbau musste, wie in Abbildung 29 ersichtlich ist, auf eine symmetrische Probenanordnung geachtet werden.

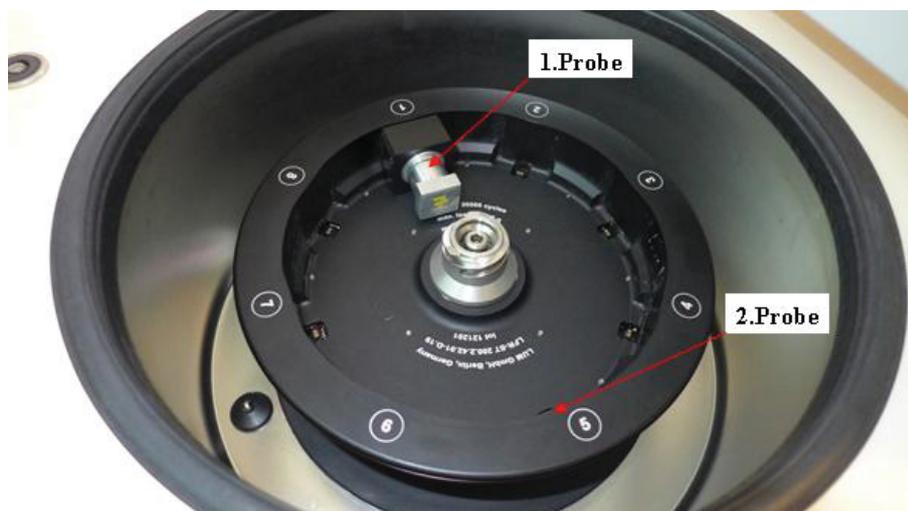


Abbildung 29) Probenanordnung Zentrifugentest [40]

Im Anschluss wurde jede Prüf- und Massekörperkombination abgewogen und der Abstand zur Rotationsachse bestimmt. Anhand dieser Daten wurden vom Prüfgerät der Abstand zur Rotationsachse sowie die Prüfkraft ermittelt.

### 3.6. Wedge-Test

#### 3.6.1. Konstruktion

Um den Wedge-Test an der vorhandenen Zwick-Universalprüfmaschine durchführen zu können wurde zuerst ein Prüfkeil inklusive Aufnahme konstruiert (Zeichnungen siehe Anhang B). Bei der Keilform wurde, wie in der Literatur empfohlen, eine Breite von 3,3mm sowie eine Länge von 6,35mm gewählt [29].

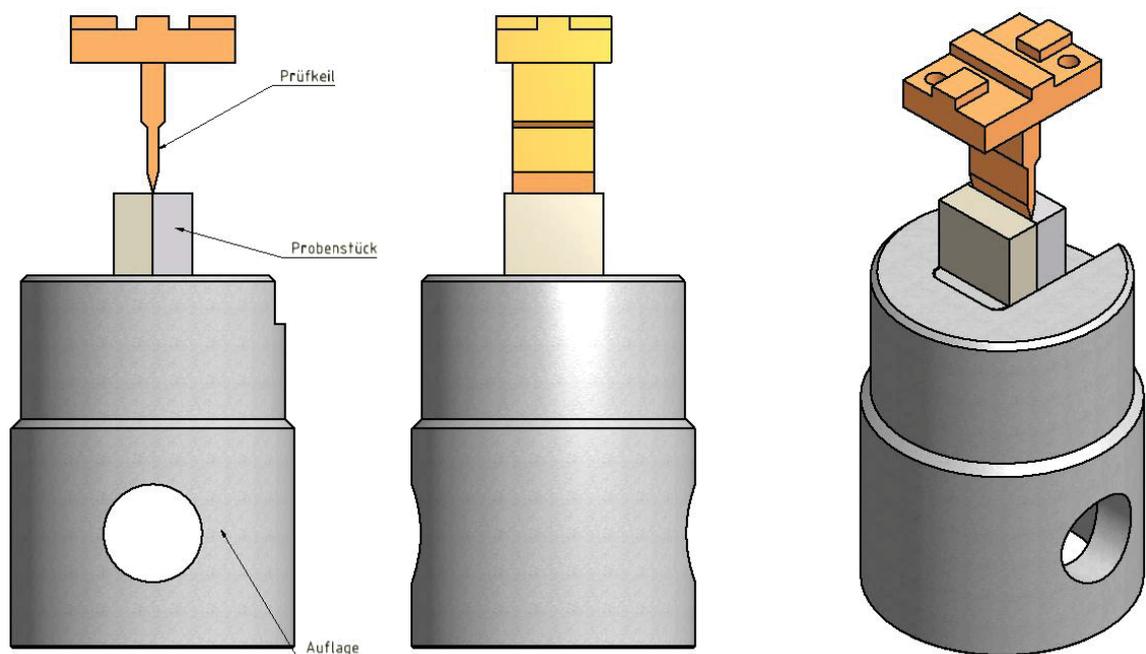


Abbildung 30) Zusammenstellung Wedge-Test

Mit Hilfe einer Distanzplatte, die mit der Probenhalterung verschraubt wurde, war es nun möglich Proben mit unterschiedlichen Aufguss- sowie Substratdicken zu prüfen.

#### 3.6.2. Probengeometrie

Die Proben wurden spanend anhand nachfolgender Abmessungen angefertigt. Die Probe wurde so fixiert, dass die Bindezone parallel zur Länge und Breite lag.

Probengeometrie		
Beschreibung	Wert	Einheit
Länge	größer 45	mm
Breite	30	mm
Dicke	11,6 bis 24	mm
Probenanzahl / Prüfung	2	Stück

Tabelle 10) Parameter Probengeometrie Wedge-Test

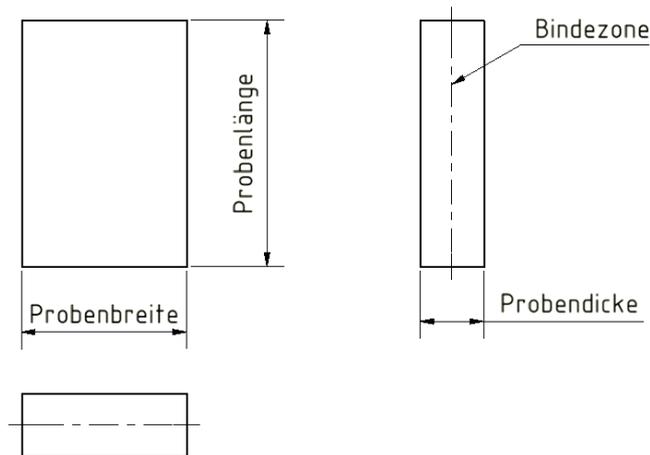


Abbildung 31) Probengeometrie Wedge-Test

### 3.6.3. Prüfparameter:

Folgende Prüfparameter wurden für die Versuchsdurchführung gewählt.

Prüfparameter		
Beschreibung	Wert	Einheit
Prüfgeschwindigkeit	100	N/mm <sup>2</sup> s
Vorlast	10,0	N
Eindringtiefe	10 bis 20	mm

Tabelle 11) Prüfparameter Wedge-Test

Die Aufzeichnung und Auswertung des Messsignals erfolgte mit Hilfe der Software Zwick TestXpert II.

## 3.7. Stoßprüfung

### 3.7.1. Berechnung und Konstruktion

Im ersten Schritt wurde die maximale Schnittkraft bei einer Spanbreite von 0,1mm beziehungsweise 0,2mm berechnet.

$$F_S = k_{C11} \times f^{1-j} \times a_s \times \sin(\alpha_r)^{-j} \quad \text{Gl. 6.1}$$

$$F_{S \max} = F_S \times k_1 \quad \text{Gl. 6.2}$$

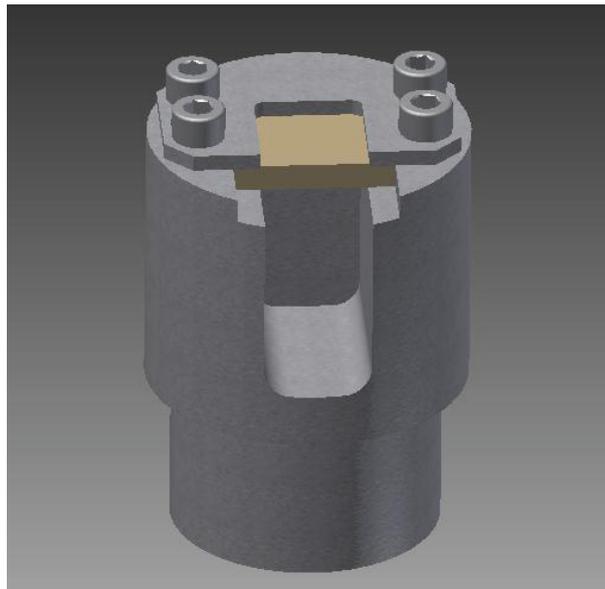
	Parameter		Einheit
f	0,1	0,2	mm
k <sub>C11</sub>	2630	2430	N/mm <sup>2</sup>
a <sub>s</sub>	4	4	mm
α <sub>r</sub>	60	60	°
j	0,17	0,17	-
k <sub>1</sub>	1,1	1,1	-

Tabelle 12) Parameter Stoßkraftberechnung

	Ergebnisse		Einheit
$F_S$	1595	2619	N
$F_{S\max}$	1754	2881	N

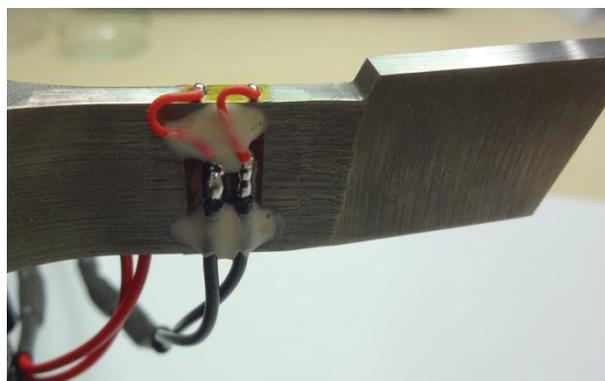
**Tabelle 13) Ergebnisse Stoßkraftberechnung**

Anhand der ermittelten Daten wurde eine zentrische Probenhalterung für die gewählte Probengeometrie konstruiert (Abbildung 32).



**Abbildung 32) Probenhalterung Stoßversuch**

Für die Stoßprüfung ist ein Schneidwerkzeug (Schnittbreite von 4mm) mit Dehnmessstreifen bestückt worden (Abbildung 33). Hierbei wurde jeweils ein DMS an der Front bzw. an der Rückseite des Werkzeugs angebracht. Durch diese doppelseitige Anbringung konnten die korrelierenden Druck- beziehungsweise Zugbelastungen bestimmt werden.



**Abbildung 33) DMS-Positionierung [41]**

### 3.7.2. Probengeometrie

Für die ersten Versuche wurden Proben mit den in der Tabelle 14 angegebenen Maßen verwendet.

Probengeometrie		
Beschreibung	Wert	Einheit
Länge	30,0	mm
Breite	24,0	mm
Dicke	3 oder 5	mm

Tabelle 14) Probengeometrie Stoßversuch

Die hier verwendete Probengeometrie ist in Abbildung 34 dargestellt.

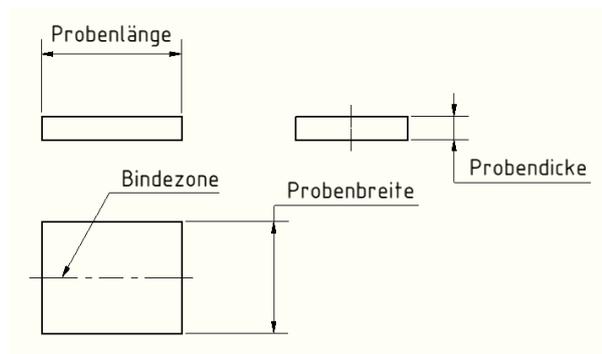


Abbildung 34) Probengeometrie Stoßversuch

### 3.7.3. Prüfparameter

Die Stoßversuche wurden an einer Vertikalstoßmaschine durchgeführt. Die messtechnische Hard- und Software ist vom Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau zur Verfügung gestellt worden. Hierbei wurde ein Messverstärker (HBM QuantumX-Messverstärker) sowie die Software Catman der Firma HBM verwendet.

Die Prüfung wurde mit folgenden Parametern durchgeführt:

Prüfparameter		
Beschreibung	Wert	Einheit
Stoßgeschwindigkeit	25 bis 50	Hübe/min
Vorschubgeschwindigkeit	0,1 bis 0,2	mm/Hub
Prüfrichtung	Substrat --> Aufguss	-
	Aufguss --> Substrat	-

Tabelle 15) Prüfparameter Stoßversuch

## **4. Ergebnisse**

### **4.1. Materialauswahl**

Im Rahmen der ersten Versuche wurde Material des Verbundgussmoduls der Firma Miba Gleitlager GmbH verwendet. Da die Haftfestigkeit dieses Materials jedoch sehr inhomogen war wurden die weiteren Versuche an zwei Versuchstreifen, welche an der Anlage des utg gegossen wurden, durchgeführt. Hierbei handelte es sich um einen Streifen mit nachweislich guter und einen mit schlechter Bindung.

Da das utg im Rahmen der Prozessüberwachung bereits Zugscherversuche durchgeführt hat, wurden aus den Resten dieser Streifen Proben entnommen, um eine Korrelation der Ergebnisse herstellen zu können.

Eine genauere Dokumentation der Materialauswahl ist den Tabellen im Anhang A zu entnehmen.

### **4.2. Zugprüfung**

Die ersten Zugversuche wurden an Proben des Verbundgussmoduls der Firma Miba Gleitlager GmbH durchgeführt. Hierbei konnten folgende Ergebnisse festgestellt werden:

#### **Grundlagenversuche**

Für die ersten Versuche wurden Klemmbacken mit einer Gesamtlänge von 50mm verwendet. Die Proben wurden mit Hilfe von Schrauben (Güteklasse 8.8) bei einem Anzugsmoment von 20Nm fixiert. Mit diesem Aufbau konnten die ersten Proben erfolgreich getestet werden.

Die Versuche zeigten jedoch auch, dass eine Montage der Schrauben auf Grund der geringen Backenlänge nur schwer durchführbar ist. Des Weiteren kam es auf Grund einer zu geringen Backenrauheit zu einem Abrutschen der Proben.

Anhand dieser Erkenntnisse wurden die Klemmbacken auf eine Gesamtlänge von 80mm verlängert und die Klemmoberfläche aufgeraut (Zeichnungen im Anhang B).

#### **Erste Versuchsreihe:**

Mit Hilfe der neuen Klemmbacken konnten die ersten Versuche, an Proben mit einer Dicke von 5mm, durchgeführt werden. Im Rahmen der ersten Versuche stellte sich heraus, dass es bei Proben mit einer Haftfestigkeit größer 45MPa zu einem Abrutschen in der Einspannung kam (siehe Abbildung 35).



Abbildung 35) Zugversuch 1. Versuchsreihe

Um diesem Abrutschen entgegen zu wirken, wurde das Anzugsmoment der Schrauben auf 25Nm erhöht, was allerdings zum Versagen der Schrauben führte.

Aus diesem Grund wurde die Verschraubung durch Schrauben der Güteklasse 12.9 ersetzt.

Mit Hilfe dieser Maßnahme konnte die Versuchsreihe fortgesetzt werden.

Probennummer	Zugversuch									
	A-1	A-2	A-3	M-1	M-2	M-3	E-1	E-2	E-3	MW
Nr.	[MPa]									
VGM 92	52	54	50	74	78	62	- <sup>1</sup>	- <sup>1</sup>	- <sup>1</sup>	61
VGM 93	52	49	49	46	53	41	- <sup>1</sup>	- <sup>1</sup>	- <sup>1</sup>	48
VGM 94	23	25	29	60	69	43	7	10	9	30
VGM 96	28	29	25	47	53	31	32	65	32	38
VGM 96_HT	22	17	14	28	61	55	- <sup>1</sup>	- <sup>1</sup>	- <sup>1</sup>	32
VGM 97	21	23	-	38	43	37	49	41	50	37
VGM 97_HT	-	10	11	38	31	35	47	40	40	31
VGM 84	27	14	22	- <sup>1</sup>	- <sup>1</sup>	- <sup>1</sup>	39	18	26	24

<sup>1</sup>Keine Probenentnahme möglich

Tabelle 16) VGM-Versuche 5mm Proben

Die ersten Versuchsergebnisse (Anhang D1 und Tabelle 16) zeigen, dass bei guter Bindung mit einer Haftfestigkeit größer 40MPa zu rechnen ist (Probe VGM92/VGM97). Trotz des erhöhten Anzugsmoments, kam es bei einigen Proben zu einem Abrutschen im Reinaluminium. Wie in Abbildung 36 ersichtlich ist kam es beim Abrutschen zwar zu einem Kraftmaximum in der Aufzeichnung, jedoch versagte dabei die Probe nicht.

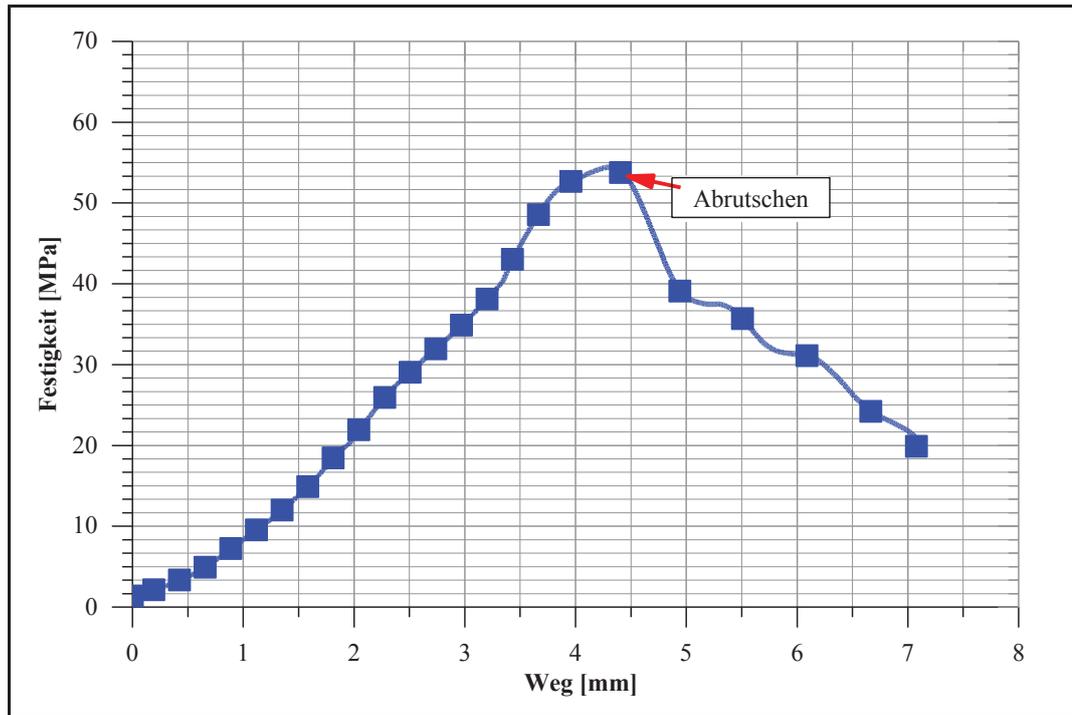


Abbildung 36) Zugversuchskurve 92A-2

**Zweite Versuchsreihe:**

Um die Prüfkraft beziehungsweise die daraus folgende Klemmkraft zu reduzieren, wurde in der zweiten Versuchsreihe die Probendicke auf 2,5mm reduziert. Hierfür wurden einige 5mm Probe an einer Tellerschleifmaschine abgeschliffen und anschließend erneut geprüft.

Hierbei traten folgende Ergebnisse auf:



Abbildung 37) Zugversuch 2. Versuchsreihe

Probennummer	Zugversuch									
	A-1	A-2	A-3	M-1	M-2	M-3	E-1	E-2	E-3	MW
Nr.	[MPa]									
VGM 92_HT	- <sup>1</sup>	- <sup>1</sup>	- <sup>1</sup>	- <sup>1</sup>	73	73	83	78	36	70
VGM 93_HT	28	42	47	46	53	72	- <sup>2</sup>	- <sup>2</sup>	- <sup>2</sup>	48
VGM 94_HT	35	19	36	61	55	68	46	18	25	40

<sup>1</sup> Wurden im Rahmen der ersten Versuchsreihe geprüft

<sup>2</sup> Keine Probenentnahme möglich

Tabelle 17) VGM-Versuche 2,5mm Proben

Die Zugversuchskurven zu den Versuchen, sind im Anhang D1 zu finden.

### Dritte Versuchsreihe:

In der zweiten Versuchsreihe konnte festgestellt werden, dass eine Dickenreduktion von 5mm auf 2,5mm eine Reduktion der Prüfkraft bewirkt und somit ein Abrutschen der Probe verhindert werden kann. Da sich dadurch jedoch die Prüffläche halbiert, sollte die Probendicke bei der dritten Versuchsreihe wieder etwas erhöht werden. Die hierfür benötigten Proben wurden an einer Erodieranlage mit einer Dicke von 3mm gefertigt.

Im Zuge der dritten Versuchsreihe sollte die minimale Einspannfläche festgestellt werden. Hierfür wurde aus dem Strang V51 des utg-Materials 24 Proben entnommen.

Die Einspanntiefe wurde zwischen 2,5mm und 8mm variiert, wobei die Tiefe vor dem Fixieren markiert wurde. Pro Parametersatz wurden zwei Versuche durchgeführt.

Die ersten Versuche zeigten, dass die Dickenerhöhung auf 3mm keine Auswirkung auf die Probenfixierung hat.

Probennummer	Zugversuch			
	Einspannung	Probe 1	Probe 2	MW
Nr.	[mm]	[MPa]		
ZV1.1	2,5	29	31	<b>30</b>
ZV1.2	3,0	21	30	<b>26</b>
ZV1.3	3,5	7	0 <sup>1</sup>	<b>7</b>
ZV1.4	4,0	14	0 <sup>1</sup>	<b>14</b>
ZV1.5	4,5	7	29	<b>18</b>
ZV1.6	5,0	31	18	<b>25</b>
ZV1.7	5,5	25	22	<b>24</b>
ZV1.8	6,0	33	29	<b>31</b>
ZV1.9	6,5	25	37	<b>31</b>
ZV1.10	7,0	30	32	<b>31</b>
ZV1.11	7,5	13	33	<b>23</b>
ZV1.12	8,0	30	20	<b>25</b>

<sup>1</sup> Bruch in der Einspannung

**Tabelle 18) Ergebnisse Einspannungstests V51**

Die dazugehörigen Zugversuchskurven sind ebenfalls dem Anhang D1 zu entnehmen.

Die Einspannungstests lieferten das Ergebnis, dass die Einspanntiefe größer als 2,5mm sein muss, da ansonsten keine Fixierung der Probe mehr möglich ist. Des Weiteren zeigte sich, dass es bei einigen Proben (ZV1.3 und ZV1.4) bereits beim Einspannen zu einem Versagen dieser kam. Die Ursache hierfür war das hohe Anzugsmoment der Schrauben, das eine Vorschädigung des Materials hervorgerufen hat.

## Vierte Versuchsreihe

Im Rahmen der ersten drei Versuchsreihen konnte festgestellt werden, dass der Zugversuch als quantitatives Prüfverfahren geeignet ist. Um dieses Ergebnis zu verifizieren und einen Vergleich zu den anderen Prüfverfahren herstellen zu können wurden in der vierten Versuchsreihe weitere Versuche an verschiedenen Proben durchgeführt.

Hierbei konnten die in den folgenden Tabellen angegebenen Haftfestigkeiten ermittelt werden:

Probennummer	Zugversuch		
	Probe 1	Probe 2	MW
Nr.	[MPa]		
V071-01	10	5	<b>8</b>
V071-02	0 <sup>1</sup>	4	<b>4</b>
V070-01	0 <sup>1</sup>	10	<b>10</b>
V070-02	9	14	<b>12</b>
V072-03	26	24	<b>25</b>
V072-04	18	36	<b>27</b>
V070-03	49	32	<b>41</b>
V070-04	60	62	<b>61</b>
V101-01	45	58	<b>52</b>
V101-02	53	47	<b>50</b>
V072-01	43	49	<b>46</b>
V072-02	40	43	<b>42</b>
V101-03	61	65	<b>63</b>
V101-04	48	57	<b>53</b>
V108-01	61	61	<b>61</b>
V108-02	66	65	<b>66</b>

<sup>1</sup> Bereits beim Einspannen versagt

**Tabelle 19) Ergebnisse Zugprüfung Teil 1**

Probennummer	Zugversuch		
	Probe 1	Probe 2	MW
Nr.	[MPa]		
V110-01	64	64	<b>64</b>
V110-02	62	63	<b>63</b>
V110-03	60	63	<b>62</b>
V110-04	58	58	<b>58</b>
V110-05	63	62	<b>63</b>
V110-06	64	64	<b>64</b>

**Tabelle 20) Ergebnisse Zugprüfung Teil 2**

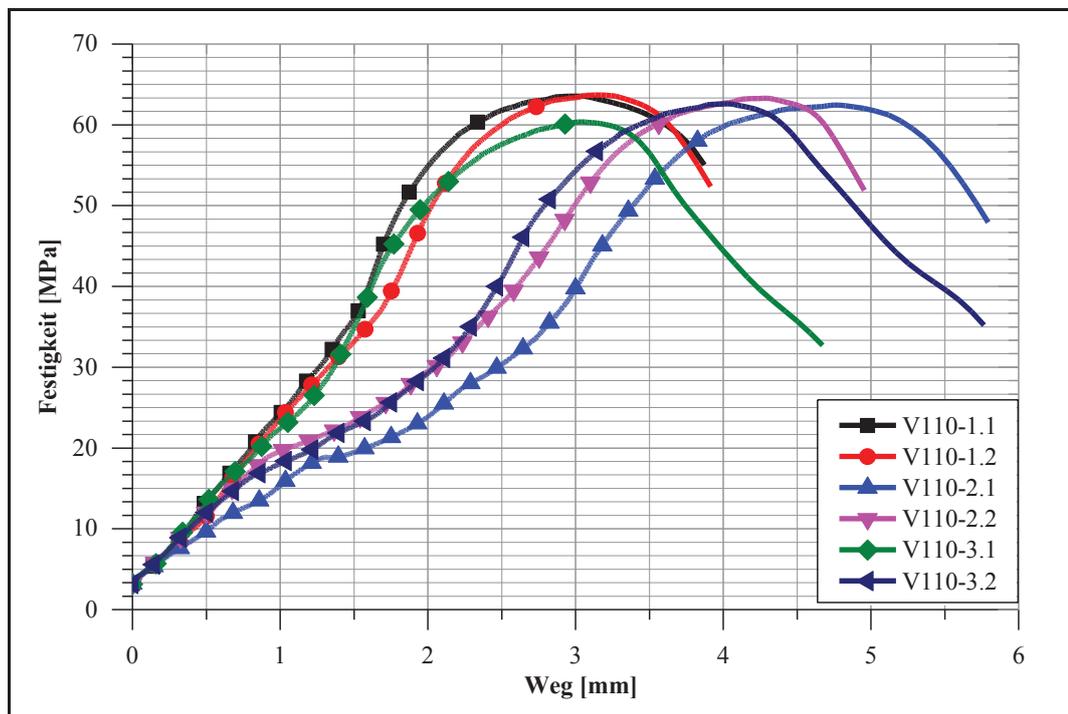
Versuchsnummer	Zugversuch						
	1	2	3	4	5	6	MW
Nr.	[MPa]						
VGM 79	54	15	56	29	32	26	<b>35</b>
VGM 87	5	6	10	0 <sup>1</sup>	0 <sup>1</sup>	0 <sup>1</sup>	7
VGM 88	5	5	9	0 <sup>1</sup>	10	0 <sup>1</sup>	7
VGM 89	85	79	81	29	10	52	<b>56</b>
VGM101	65	54	64	41	38	55	<b>53</b>

<sup>1</sup> Bereits beim Einspannen versagt

**Tabelle 21) VGM-Versuche 3mm Proben**

Bei einigen Proben kam es bereits beim Einspannen zu einem Versagen in der Bindezone. Diese Ergebnisse wurden in der Tabelle 19 bis 21 mit dem Wert 0 hinterlegt.

Im Zuge der vierten Versuchsreihe konnte festgestellt werden, dass die ermittelten Haftfestigkeitswerte der utg-Proben homogener sind als jene der Miba-Proben (siehe Abbildung 38). Aus diesem Grund wurden in den folgenden Untersuchungsmethoden vermehrt utg-Proben geprüft werden.



**Abbildung 38) Zugversuchskurven V110 Teil 1**

Des Weiteren konnte sowohl bei den utg als auch bei den Miba-Proben, bei Haftfestigkeiten größer als 60MPa, ein Einschnüren im Aufgussmaterial festgestellt werden. Um sicher zu stellen, dass diese Einschnürung nicht auf die Kerbwirkung der

Klemmbacken zurückzuführen war, wurde sowohl das Substrat als auch des Aufgussmaterial hinsichtlich seiner Zugfestigkeiten charakterisiert.

### 4.3. Untersuchung der Einzelkomponenten der Verbunde

Auf Grund der Tatsache, dass von den hier betrachteten Legierungen noch keine Zugfestigkeitswerte vorlagen, wurden sowohl von den Substrat- als auch von den Aufgussmaterialien Zugversuche durchgeführt.

Von jeder Materialvariante wurden drei Zugproben laut der Abbildung in Anhang C gefertigt.

Untersucht wurden hierbei V51 und V110 des utg-Materials sowie VGM 84 des Miba-Materials.

Relevant für die weiteren Untersuchungen sind in erster Linie die Minimalwerte der Materialzugfestigkeiten:

Versuchsnummer	Material	Zugfestigkeit					
		Probe 1	Probe 2	Probe 3	MW	Min	Max
		[MPa]					
VGM84	AlCuMn+	107	92	63	87	63	107
VGM84	AlSn25+	75	92	50	72	50	92
V51	Al99,7	53	55	56	55	53	56
V51	AlSn6+	56 <sup>2</sup>	59 <sup>2</sup>	95 <sup>1</sup>	95	95	95
V110	Al99,7	52	60	58 <sup>3</sup>	56	52	60
V110	AlSn6+	30 <sup>2</sup>	113 <sup>1</sup>	91 <sup>1</sup>	102	91	113

<sup>1</sup> Bruch außerhalb des Messbereichs; Wert aber plausibel [45]

<sup>2</sup> Bruch außerhalb des Messbereichs; Wert nicht verwendbar

<sup>3</sup> Probe abgerutscht; Wert nicht verwendbar

**Tabelle 22) Zugfestigkeit der Einzelkomponente der Verbunde**

Die Spannungs-Dehnungsverläufe sind im Anhang D2 angeführt.

Es zeigte sich, dass die Festigkeitswerte des Reinaluminiums im Bereich der ermittelten Haftfestigkeitswerte von V110 liegen. Aus diesem Grund ist die im Haftzugversuch auftretende Einschnürung auf ein Versagen des Reinaluminiums zurückzuführen.

Des Weiteren zeigt sich, dass bei den Miba-Proben eine große Streuung auftrat. Der Grund hierfür dürfte die Inhomogenität des Probenmaterials sein.

### 4.4. Zentrifugentest

#### Grundlagenversuche

Für die ersten Versuche mit der Zentrifuge wurde, um die Durchführbarkeit des Prüfverfahrens zu überprüfen, sowohl Material der Miba Gleitlager GmbH als auch Material vom utg verwendet.

Da anfangs noch nicht klar war, bis zu welchen Haftfestigkeiten geprüft werden kann wurden Proben mit einer Haftfestigkeit unter 40MPa (im Zugversuch ermittelt) ausgewählt. Bei den utg Proben wurde Versuch Nummer V51 mit einer mittleren Haftfestigkeit von 23MPa gewählt. Bei diesen Prüfkörpern versagten einige bereits im Rahmen der Fertigung. Somit konnten lediglich 10 der 16 Proben hergestellt werden.

Die Proben des Miba Verbundgussmoduls mit der Versuchsnummer VGM84 ergaben eine mittlere Haftfestigkeit von 27MPa. Hier konnten dem Streifen 16 Proben entnommen werden.

Im Rahmen der Materialprüfung konnten bei den utg-Proben folgende Ergebnisse erzielt werden:

Probennummer	Bruchkraft	Festigkeit	Bruchverhalten
	[N]	[MPa]	
V51-3	1266	16	Bruch in der Bindezone
V51-4	332	4	Bruch in der Bindezone
V51-6	833	10	Bruch in der Bindezone
V51-7	1859	23	Bruch in der Bindezone
V51-8	1808	23	Abriss des Gewindestifts
V51-10	1296	16	Bruch in der Bindezone
V51-11	560	7	Bruch in der Bindezone
V51-13	309	4	Bruch in der Bindezone
V51-14	893	11	Bruch in der Bindezone
V51-15	1996	25	Abriss des Gewindestifts
<b>Mittelwert</b>	<b>1115</b>	<b>14</b>	-

**Tabelle 23) Ergebnisse utg-Proben**

Bei den VGM-Proben konnten folgende Ergebnisse erzielt werden:

Probennummer	Bruchkraft	Festigkeit	Bruchverhalten
	[N]	[MPa]	
VGM84-1	1305	17	Bruch in der Bindezone
VGM84-2	1060	14	Abriss des Gewindestifts
VGM84-3	1103	14	Abriss des Gewindestifts
VGM84-4	977	12	Ausriss um den Gewindestift
VGM84-5	1346	17	Verjüngung des Gewindestifts
VGM84-6	1229	16	ca. 80% Bruch in der Bindezone
VGM84-7	1273	16	Bruch in der Bindezone
VGM84-8	956	12	Bruch in der Bindezone
<b>Mittelwert</b>	<b>1156</b>	<b>15</b>	-

**Tabelle 24) Ergebnisse VGM-Proben**

Wie in Abbildung 39 ersichtlich kam es bei einigen Proben zu einem Bruch im Freistich des Gewindestiftes. Die übrigen Bruchbilder sind dem Anhang D3 zu entnehmen.



Abbildung 39) Bruchbild Zentrifugentest VGM84-2 [39]

Es zeigte sich, dass bei diesen Proben ein Versagen im Aufgussmaterial auftritt. Bei diesen Proben stimmt die errechnete Prüffläche nicht mit der tatsächlichen Prüffläche überein. Eine Anpassung der Prüffläche auf den Durchmesser des Gewindes ergab folgende Werte:

Probennummer	Bruchkraft	Prüffläche	Festigkeit	Bruchverhalten
	[N]	[mm <sup>2</sup> ]	[MPa]	
VGM84-2	1060	19,6	54	Bruch in der Bindezone
VGM84-3	1103	19,6	56	Abriss des Gewindestifts
VGM84-5	1346	19,6	69	Abriss des Gewindestifts
V51-8	1808	19,6	92	Ausriss um den Gewindestift
V51-15	1996	19,6	101	Verjüngung des Gewindestifts

Tabelle 25) Angepasste Ergebnisse

Im Zuge der Grundlagenversuche konnte festgestellt werden, dass dieses Prüfverfahren für die Materialprüfung eines Aluminiumverbundes geeignet ist, jedoch bedurfte es, im Zuge der ersten Versuchsreihe, einiger Adaptierungen.

Es kann nicht mit Sicherheit gesagt werden, ob es sich bei dem Versagen im Freistich um ein Versagen des Werkstoffs oder ein Versagen aufgrund einer Fehlereinbringung bei der Fertigung handelt. Aus diesem Grund wurden im zweiten Schritt Proben mit einem Gewindestift M8 gefertigt um die Spannung im Freistich sowie im Gewinde zu reduzieren.

### Erste Versuchsreihe

Auf Grund der Tatsache, dass mittlerweile bereits weitere Haftfestigkeitsergebnisse durch vorangegangene Zugversuche vorlagen, wurden für diese Versuchsreihe jene Proben ausgewählt, welche bis dato die besten Eigenschaften hinsichtlich Homogenität und Haftfestigkeit aufwiesen. Daher wurden aus dem Streifen V110 (utg-Material) 14 Proben entnommen.

Der erste Durchlauf mit 8 Proben fand bei einer linearen Kraftzunahme von 10N/s statt. Wie in Tabelle 26 erkennbar ist, kam es bei allen Proben bis auf einer zu einem Versagen.

Der zweite Durchlauf wurde bei maximaler Kraftzunahme, was einem Wert von 175N/s entspricht, durchgeführt.

Die anschließende optische Untersuchung der Probenkörper ergab, dass bei diesen beiden Versuchen das M8 Gewinde die größte Schwachstelle darstellt. Keine der Proben war in der Bindezone gerissen.

Probennummer	Bruchkraft [N]	Festigkeit [MPa]	Kraftanstieg N/s	Bruchverhalten
V110-1	3314	42	10	Abscherung des Gewindes
V110-2	2976	38	10	Abscherung des Gewindes
V110-3	- <sup>1</sup>	-	10	Abscherung des Gewindes
V110-5	2228	28	175	Abscherung des Gewindes
V110-6	2462	31	175	Abscherung des Gewindes
V110-7	2372	30	175	Abscherung des Gewindes
V110-8	2169	28	10	Abscherung des Gewindes
V110-9	2406	31	175	Abscherung des Gewindes
V110-10	2300	29	175	Abscherung des Gewindes
V110-11	2523	32	175	Abscherung des Gewindes
V110-12	2375	30	10	Abscherung des Gewindes
V110-13	3014	38	10	Abscherung des Gewindes
V110-14	1960	25	10	Abscherung des Gewindes
V110-15	2176	28	10	Abscherung des Gewindes

<sup>1</sup>Durchläufer

**Tabelle 26) Ergebnisse Zentrifugentest 2.Versuchsreihe**

Wie in Abbildung 40 ersichtlich ist, kam es bei allen Proben zu einem Abscheren der Gewindegänge. Die Probe V110-3 wurde nicht komplett abgeschert und löste somit den Berührungssensor nicht aus. In Tabelle 26 wird diese Probe als Durchläufer bezeichnet.



**Abbildung 40) Aufnahme V110-11 [40]**

Wie in Abbildung 41 ersichtlich ist, liegen die Mittelwerte der beiden verschiedenen Kraftanstiege im gleichen Bereich. Bei der langsameren Prüfung mit 10N/s konnte festgestellt werden, dass die Streuung der Messwerte höher liegt als jene der schnellen Prüfung mit 175N/s.

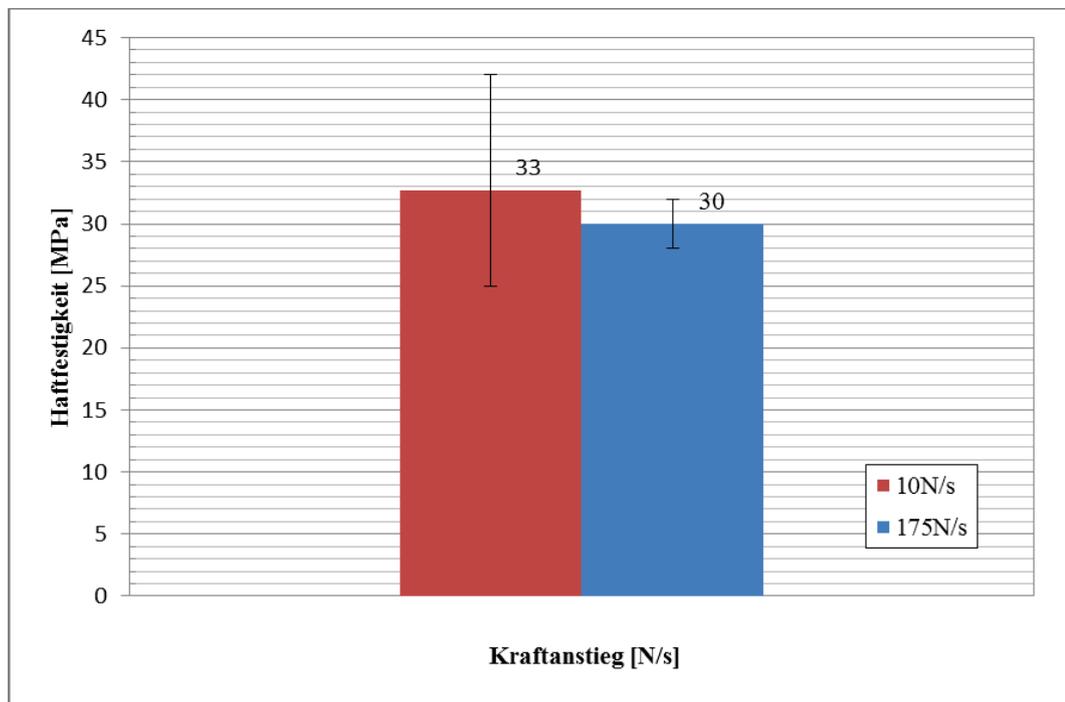


Abbildung 41) Analyse Kraftanstieg

#### 4.5. Wedge-Test

Für den Wedge-Test waren, wie für den Zentrifugentest, keine Referenzen hinsichtlich der Materialprüfung von Aluminiumverbunden vorhanden. Aus diesem Grund mussten im Rahmen eines Grundlagenversuchs die Randbedingungen festgelegt werden.

##### Grundlagenversuche

Für den ersten Grundlagenversuch wurden die Proben mit der geringsten Scherfestigkeit (Ergebnisse utg Scherzugproben) ausgewählt. Hierbei handelte es sich um Probe V70-1 sowie V70-2. Die Eindringtiefe des Keils wurde mit 20mm festgelegt.

Bei der Prüfung der Probe V70-1 konnte festgestellt werden, dass bereits nach einer Eindringtiefe von wenigen Millimetern eine Rissbildung und anschließend ein Risswachstum entlang der Bindezone auftrat. Nach 20mm Eindringtiefe wurde die Prüfung abgebrochen und die Ergebnisse analysiert. Es konnte festgestellt werden, dass wie in Abbildung 42 ersichtlich ist, ein Versagen in der Bindezone auftrat.

Die maximale Prüfkraft betrug zirka 4kN und wurde bereits nach 2 mm erreicht. Nach Erreichen der Maximalkraft kam es wie in Abbildung 44 ersichtlich ist, zu einem Abfallen der Prüfkraft.

Im nächsten Versuch wurde die Probe V70-2 geprüft. Auch hier konnte wieder, wie in Abbildung 43 ersichtlich ist, ein Risswachstum in der Bindezone festgestellt werden. Die maximale Prüfkraft betrug rund 5kN und wurde bei einer Eindringtiefe von 4mm erreicht.



Abbildung 42) Fotodokumentation Wedge-Test V70-1

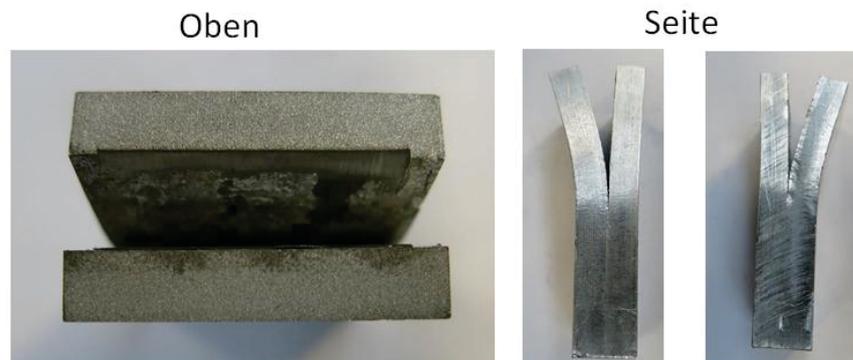


Abbildung 43) Fotodokumentation Wedge-Test V70-2

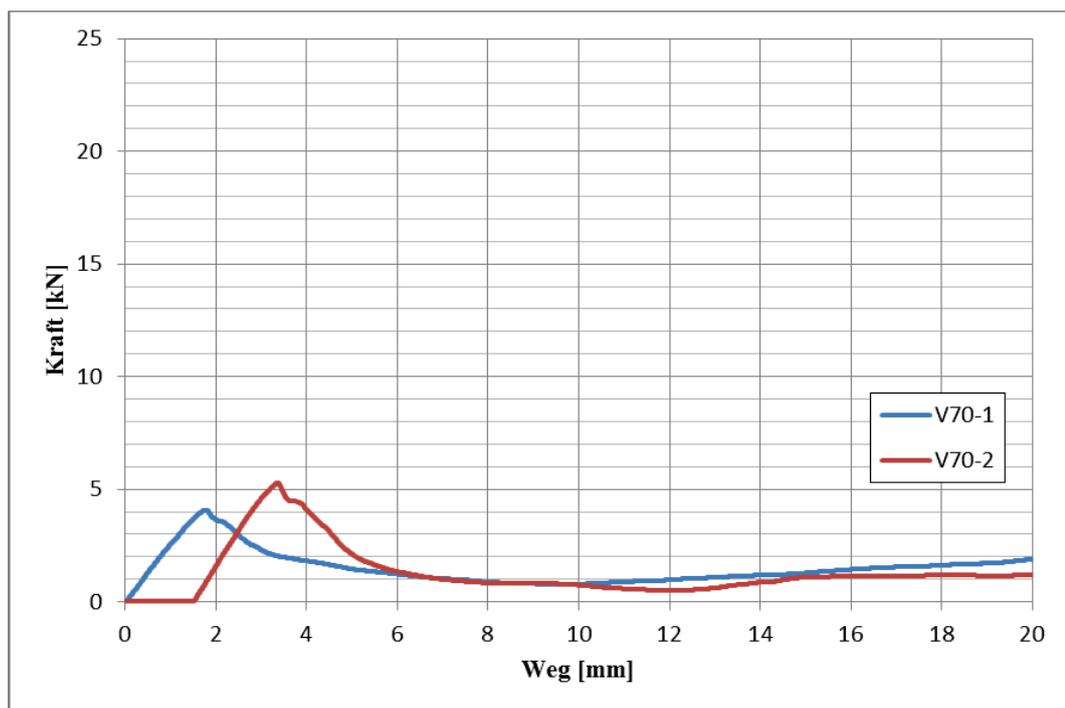
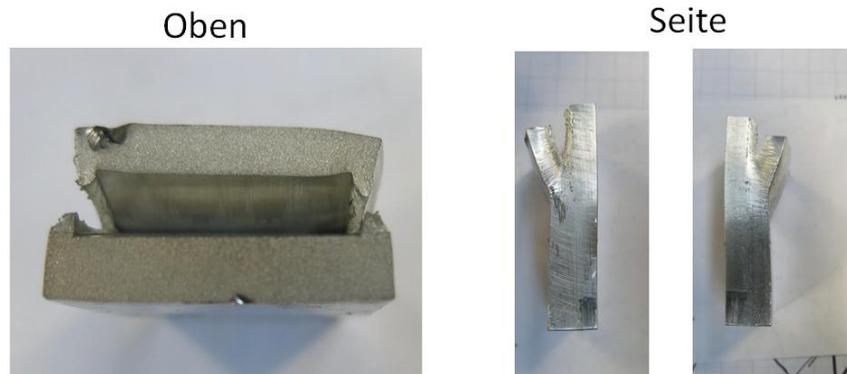


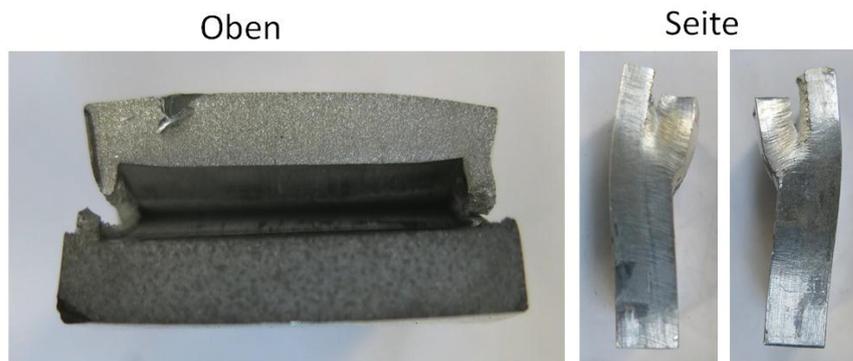
Abbildung 44) Kraftverlauf Wedge-Test V70-1/2

Im Rahmen des zweiten Grundlagenversuchs wurden die Proben V110-1 sowie V110-2 geprüft, die laut utg-Scherzugversuch die höchste Scherfestigkeit aufwiesen.

Sowohl bei Probe V110-1 als auch bei Probe V110-2 trat bei der Prüfung keine Rissausbreitung in der Bindezone statt. Stattdessen glitt der Prüfkeil, wie in der Abbildung 45 und 46 ersichtlich ist, in das weichere Material ab.



**Abbildung 45) Wedge-Test V110-1**



**Abbildung 46) Wedge-Test V110-2**

Bei beiden Proben konnte festgestellt werden, dass es zu einem kontinuierlichen Kraftanstieg kam. Am Ende der Prüfung bei 20mm betrug die Maximalkraft bei V110-1 18kN beziehungsweise bei V110-2 22kN.

Wie in Abbildung 47 ersichtlich ist, kam es bei diesen Proben zu keinem Rückgang der Prüfkraft.

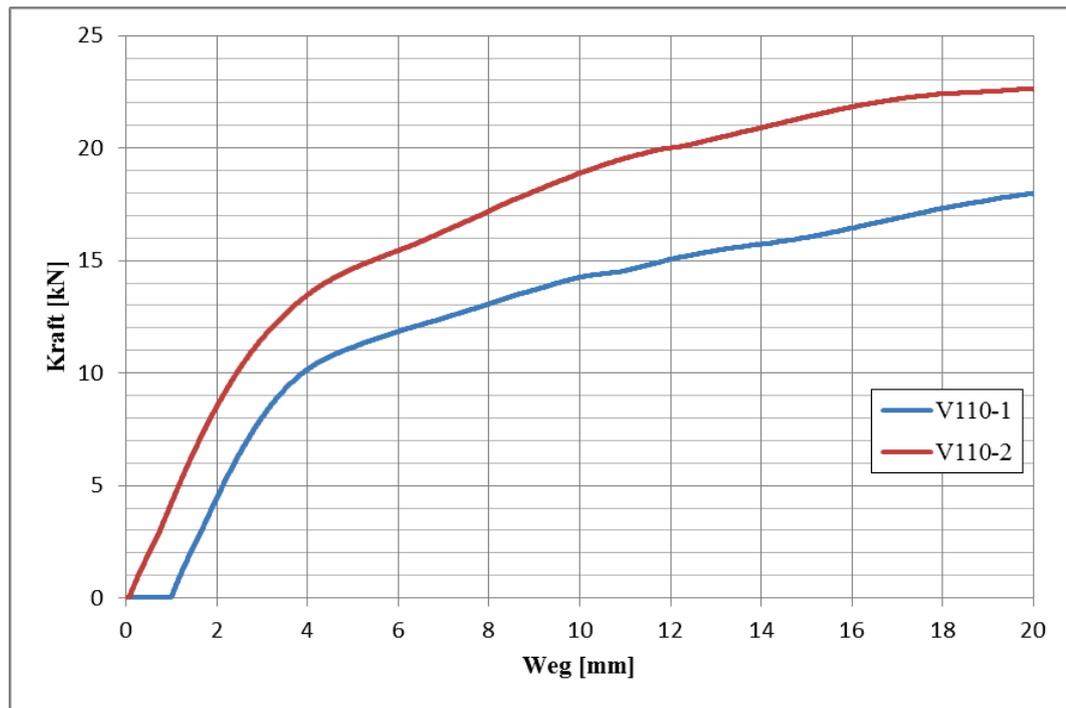


Abbildung 47) Kraftverlauf Wedge-Test V110-1/2

Im Zuge der ersten Grundlagenversuche hat sich somit gezeigt, dass eine qualitative Prüfung des Materials durchführbar ist.

### Erste Versuchsreihe:

Um zu verifizieren, ob das Prüfverfahren auch für Proben mit einem Scherhaftfestigkeitswerten zwischen V70-1 und V110-2 gültig ist, wurden im Rahmen der ersten Versuchsreihe weitere Proben mit verschiedenen Scherhaftfestigkeitsergebnissen geprüft.

Die Proben V70-3 und V70-4 zeigte sowohl eine Verformung im weicheren Material als auch eine Rissausbreitung entlang der Bindezone.

Die Prüfkraft stieg wie bei Versuch V110-1 und V110-2 kontinuierlich an. Der Maximalwert betrug 12kN beziehungsweise 20kN. Wie in Abbildung 50 ersichtlich ist, kam es auch bei diesen Proben zu keinem Rückgang der Prüfkraft.

Auf Grund der starken Biegebelastung auf den Prüfkeil kam es bei Versuch V70-4 kurz vor Ende der Prüfung zum Bruch des Keils.

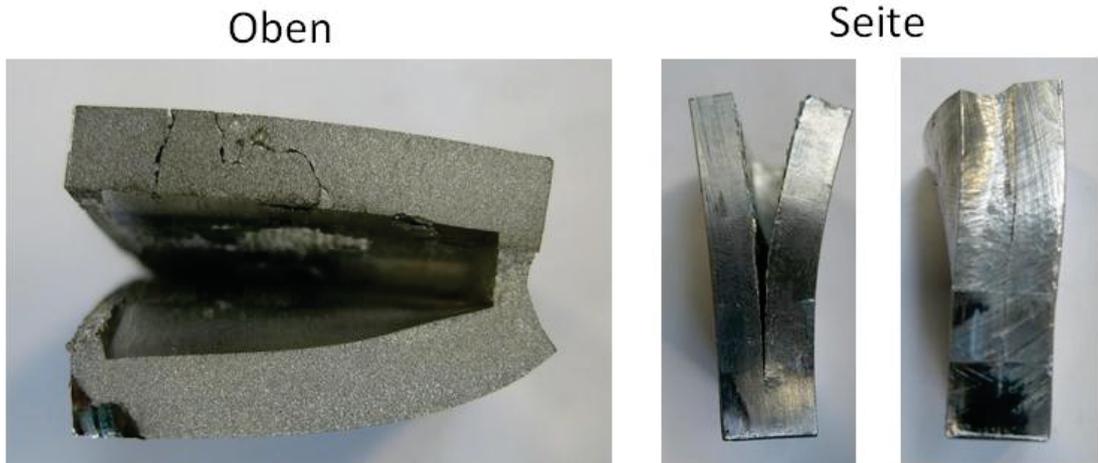


Abbildung 48) Wedge-Test V70-3

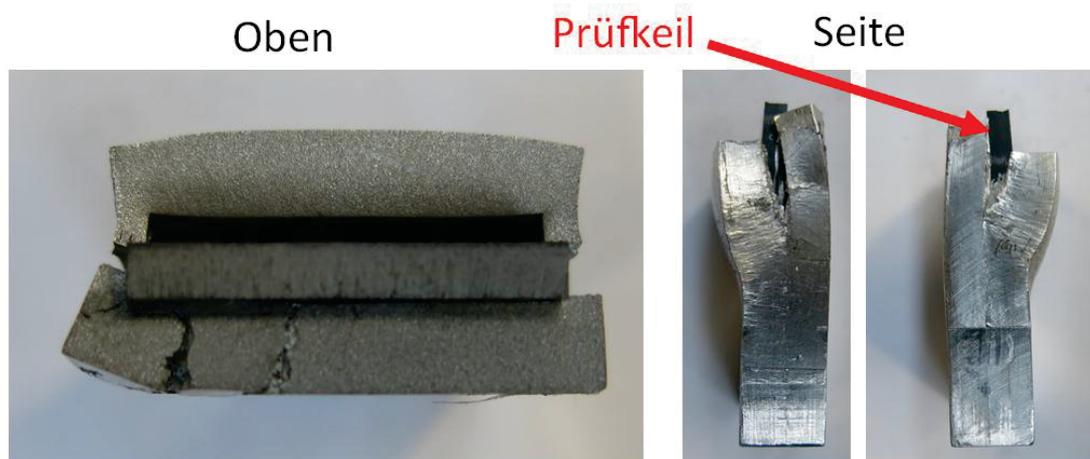


Abbildung 49) Wedge-Test V70-4

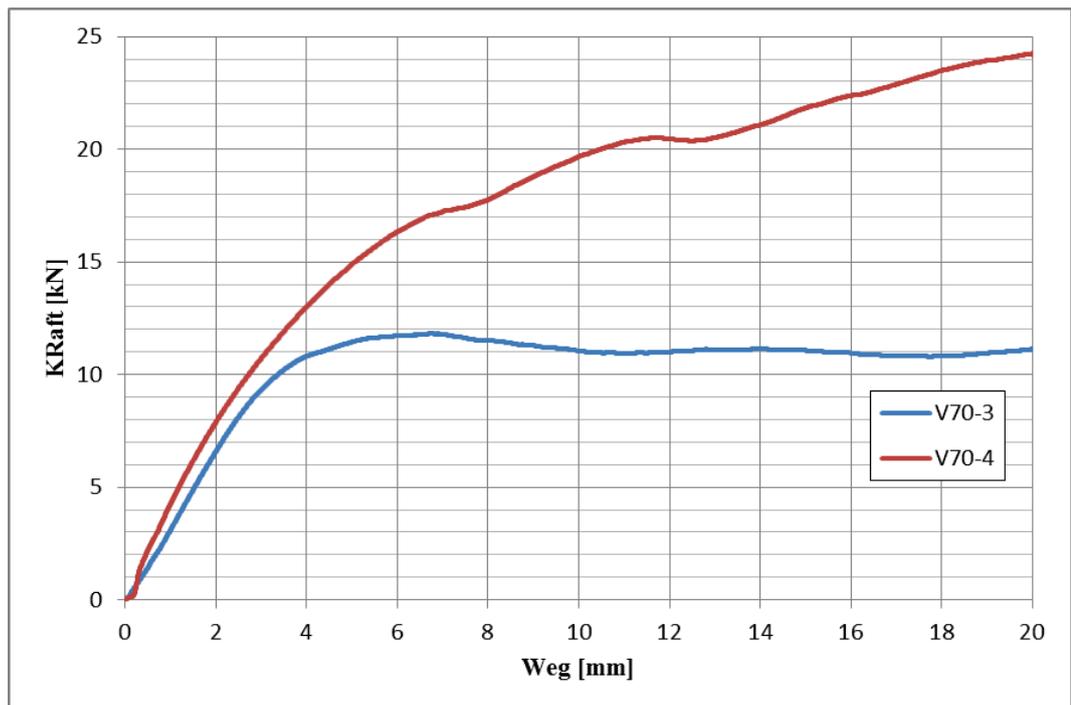


Abbildung 50) Kraftverlauf Wedge-Test V70-3/4

Die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe sowie der Grundlagenversuche zeigten, dass eine qualitative Aussage über die Haftfestigkeit, bereits nach wenigen Millimetern Eindringtiefe festgestellt werden kann. Diese Aussage kann anhand des Kraftverlaufs sowie der optischen Prüfung der Probe nach dem Test getroffen werden. Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass auf den Prüfkeil Biegebelastungen einwirkten, die schlussendlich zum Versagen des Werkzeugs führten.

### **Zweite Versuchsreihe**

Zur Durchführung der zweiten Versuchsreihe wurde ein neuer Meisel mit einer nitrierten Randschicht angefertigt. Auf Grund der Ergebnisse aus den vorherigen Versuchen, wurde die Eindringtiefe auf zehn Millimeter reduziert.

Ziel dieser Versuchsreihe war es, einerseits den neuen Meisel zu testen und andererseits die erzielten Ergebnisse durch weitere Versuche zu überprüfen. Hierbei wurden Proben mit verschiedensten Haftzugfestigkeiten beziehungsweise Scherfestigkeiten verwendet.

Im Rahmen der zweiten Versuchsreihe konnte festgestellt werden, dass der Kraftverlauf aller geprüfter Proben annähernd gleich war. Lediglich die Proben V71-1 sowie V71-2 zeigten ein Ergebnis im Bereich von V70-1. Auch die makroskopische Untersuchung nach der Prüfung ergab Ähnlichkeiten in allen Proben.

Die Kraftmessung lieferte die in Tabelle 27 angegebenen Werte. Die Fotodokumentation der geprüften Proben sowie die Kraftverläufe sind dem Anhang D4 zu entnehmen.

<b>Prüfergebnisse</b>	
<b>Versuchsnummer</b>	<b>Kraftwert</b>
	<b>[N]</b>
V70-1	4.069
V70-2	5.279
V70-3	11.817
V70-4	20.490
V71-1	5.188
V71-2	3.440
V72-1	20.140
V72-2	21.738
V101-1	19.716
V101-2	21.225
V108-1	17.917
V108-2	23.941
V110-1	18.002
V110-2	22.638
V110-3	21.585

**Tabelle 27) Ergebnisse Wedge-Test**

Es hat sich gezeigt, dass der neue Meisel hinsichtlich der Biegebelastung widerstandsfähiger ist.

Beide Versuchsserien zeigten, dass mit Hilfe des Wedge-Tests eine qualitative Aussage hinsichtlich der Haftfestigkeit getroffen werden kann. Die Eindringtiefe kann mit zehn Millimetern begrenzt werden. Um die Lebensdauer des Prüfkeils zu erhöhen, ist eine nitrierte Randschicht empfehlenswert.

#### 4.6. Stoßprüfung

Im Rahmen der ersten Versuche sollte festgestellt werden, ob dieses Verfahren für die Haftfestigkeitsprüfung verwendbar ist, beziehungsweise ob die vorhandenen Infrastruktur (Stoßmaschine, Messkraftverstärker, DMS) für die Prüfung ausreichend sind.

##### Grundlagenversuche

Die ersten Grundlagenversuche wurden an Proben des utg-Strangs V110 mit einer Dicke von fünf Millimetern durchgeführt. Für die ersten Versuche wurde eine Stoßgeschwindigkeit von 50 Hüben/min bei einem Vorschub von 0,1 mm/Hub gewählt. Wie in Abbildung 51 ersichtlich konnten bei diesem Versuch keine Aussagekraft über die Bindezone getroffen werden, da der Peak-Verlauf beider DMS nahezu gleichmäßig war, und keine Abhängigkeit von Substrat, Aufguss und Bindezone zeigte.

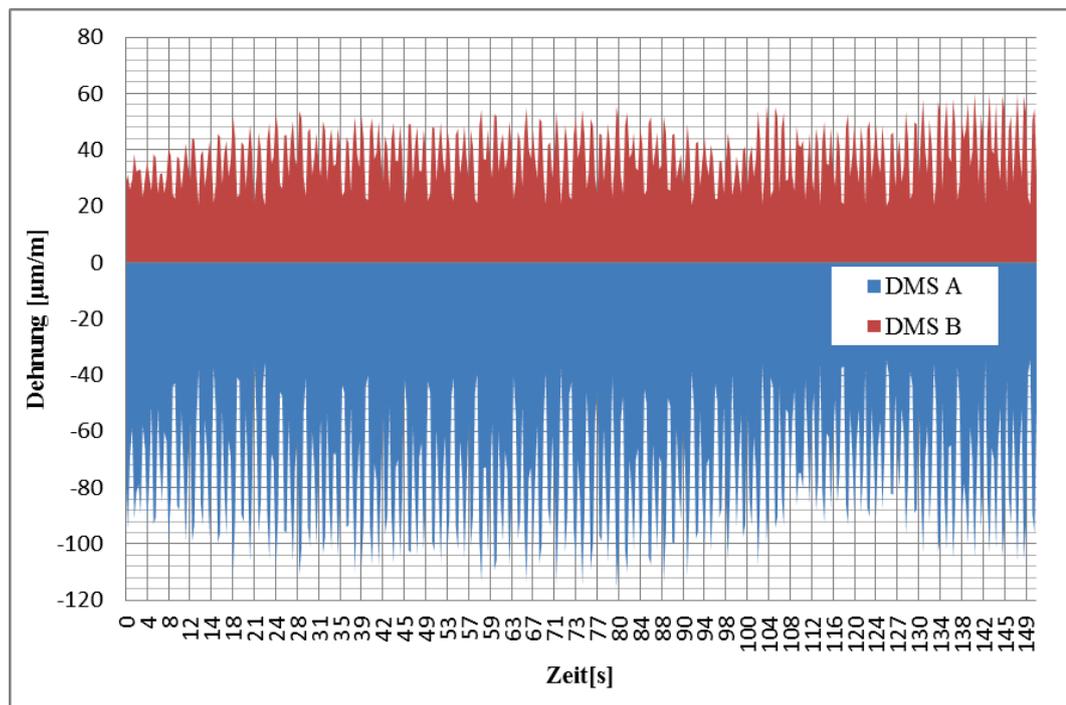


Abbildung 51) Stoßversuch-1.Test (V110-SV1.12)

Dieser Verlauf des Messsignals konnte auf ein Rauschen im Messverstärker zurückgeführt werden, welches das eigentliche Messsignal überlagerte. Ursache für dieses Rauschen war eine fehlerhafte Funktion des Messverstärkers. Um diesem Effekt entgegen zu wirken, wurde zwischen der Probenhalterung und dem Messkraftverstärker ein Masseschluss hergestellt (siehe Abbildung 52).

Durch diesen Masseschluss konnte das Rauschen stark minimiert werden (siehe Abbildung 53). Die restlichen Störsignale wurden auf Störungen durch die Fräs- und Drehmaschinen in unmittelbarer Nähe zurückgeführt.

Im Anschluss an die Prüfung wurde das Messsignal, wie in Abbildung 54 ersichtlich ist, angepasst. Diese Anpassung dient einerseits zur Reduktion der Messwerte als auch zur besseren Darstellung der Ergebnisse. Bei der abschließenden Analyse konnte festgestellt werden, dass die Dehnung des Meißels im Reinaluminium annähernd konstant war. Beim Übergang in das Substratmaterial stieg die Dehnung an.

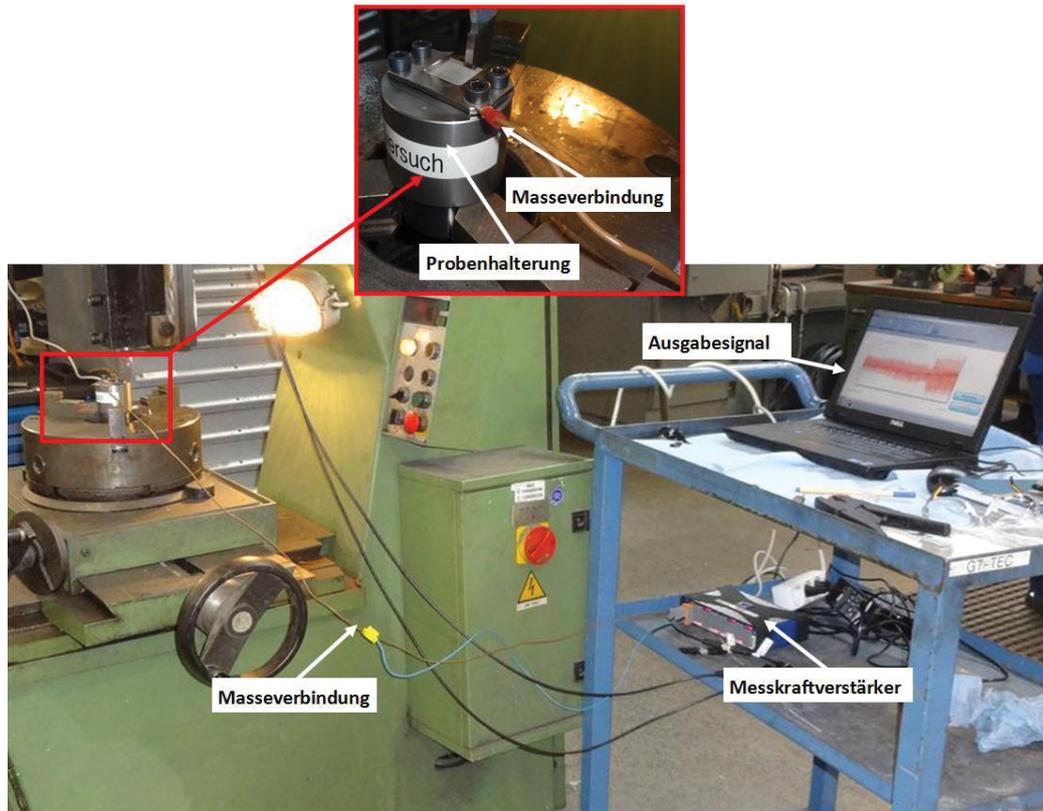


Abbildung 52) Stoßversuch mit Masseschluss [41]

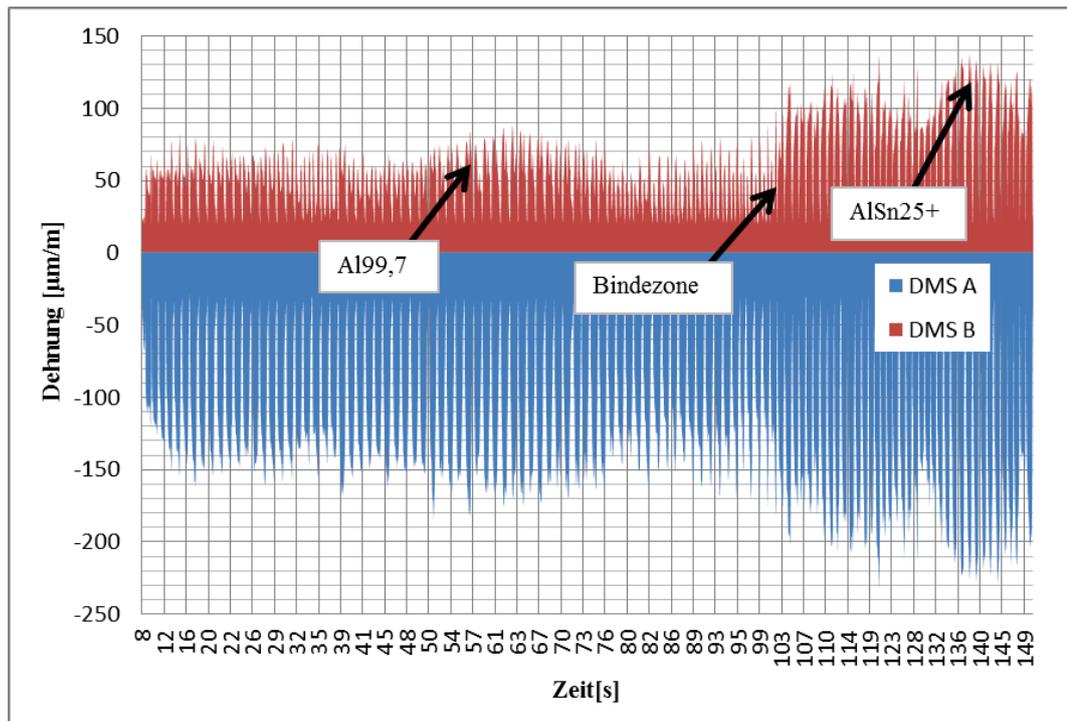


Abbildung 53) Stoßversuch V110-SV1.08

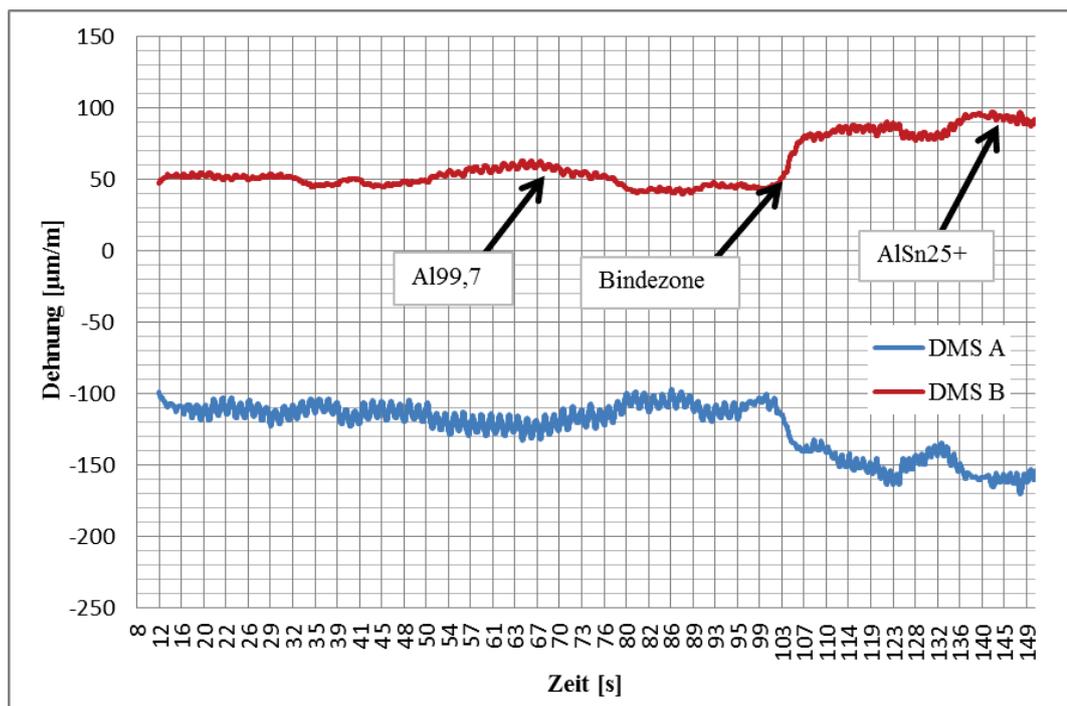


Abbildung 54) Trendlinie Stoßversuch V110-SV1.08

**Erste Versuchsreihe:**

Um die dargestellte Dehnung zu reduzieren und somit ein rauschärmeres Signal zu erhalten, wurde die Probendicke in der ersten Versuchsreihe auf drei Millimeter reduziert. Des Weiteren wurde die Materialauswahl um Proben aus dem utg-Streifen V51 erweitert.

Der Versuch, mit Probenmaterial aus Streifen V110, lieferte wie in den Abbildungen 55 und 56 zu erkennen ist, ähnliche Ergebnisse wie die Ergebnisse der fünf Millimeter Proben. Es konnte somit die Dehnung nicht gesenkt werden.

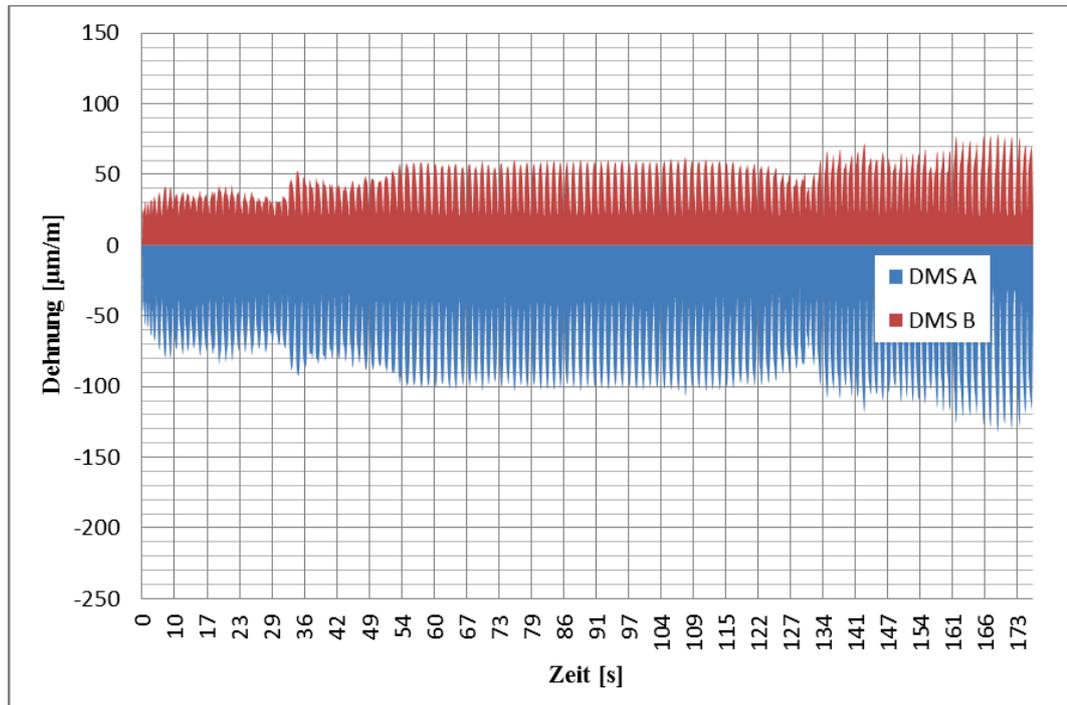


Abbildung 55) Stoßversuch V110-ZV3.9

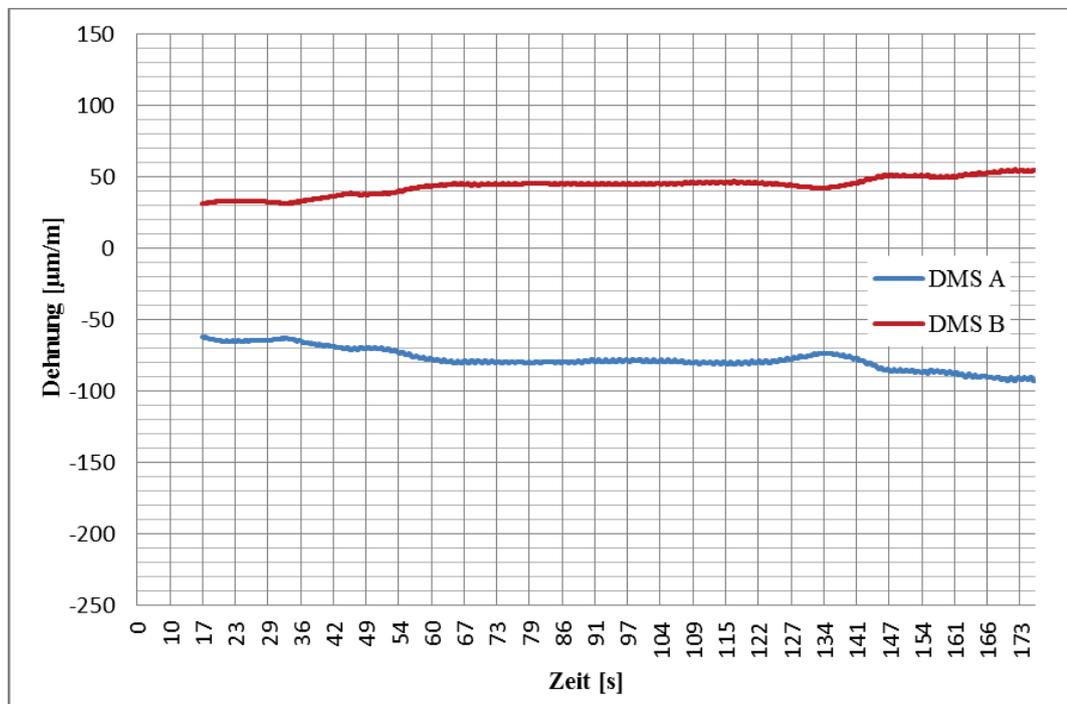


Abbildung 56) Trendlinie Stoßversuch V110-ZV3.9

Bei der Prüfung von Probenmaterial aus dem Streifen V51 kam es zu einem Abfall der Dehnung im Bereich der Bindezone. Da aus vorangegangenen Zugversuchen bereits die

schlechte Haftfestigkeit von V51 bekannt war, konnte der Rückschluss gezogen werden, dass dieser Dehnungsrückgang auf die schlechte Haftung zurückzuführen ist.

Wie in den Abbildungen 57 und 58 ersichtlich ist, kann somit eindeutig eine qualitative Aussage hinsichtlich der Haftfestigkeit getroffen werden.

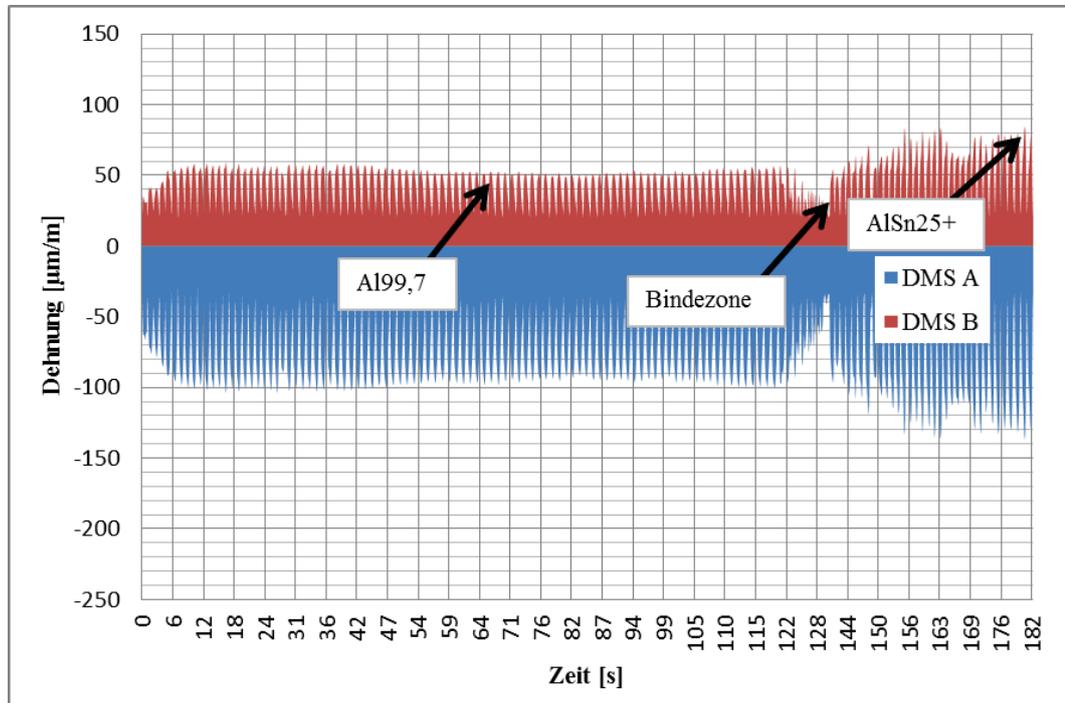


Abbildung 57) Stoßversuch V51-5

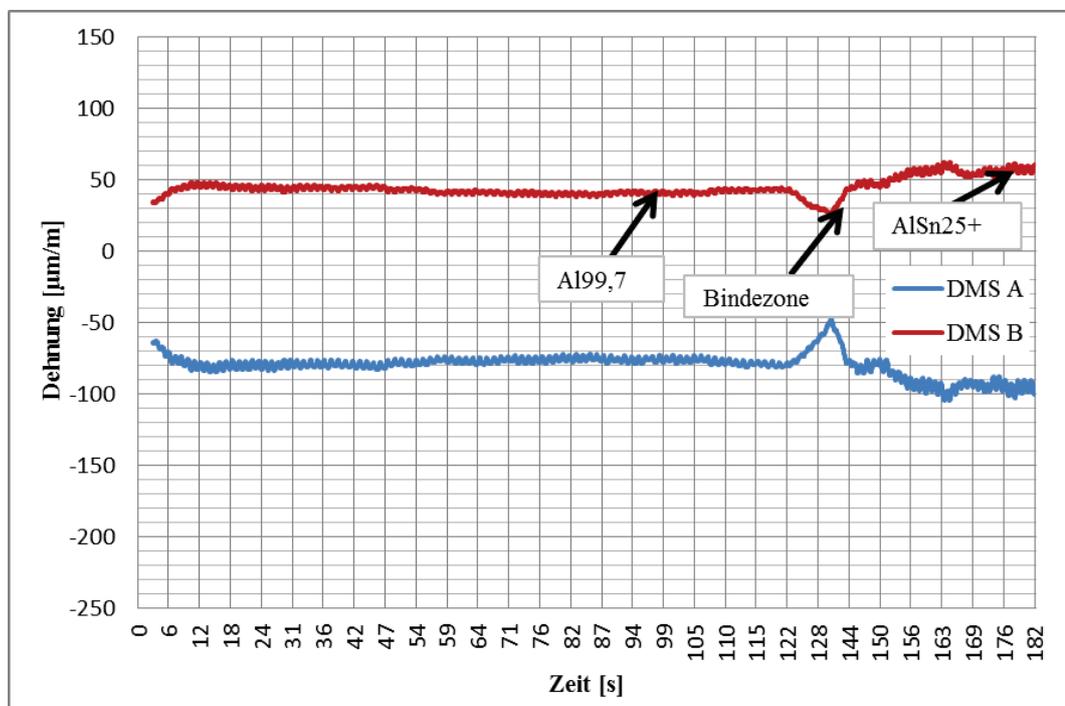


Abbildung 58) Trendlinie Stoßversuch V51-5

Von beiden geprüften Proben wurde jeweils eine weitere Probe im Rahmen der ersten Untersuchung geprüft. Anders als bei den ersten beiden wurde hier vom Substratmaterial

ausgehend ins Aufgussmaterial abgetragen. Die ermittelten Ergebnisse entsprechen jenen der beiden ersten Messungen. Die Dehnungsverläufe sind dem Anhang D5 zu entnehmen.

### Zweite Versuchsreihe:

Um die Auswirkung der Hub- beziehungsweise Vorschubgeschwindigkeit festzustellen, wurde im Rahmen der zweiten Versuchsreihe der Vorschub auf 0,2mm/Hub erhöht während die Hubgeschwindigkeit auf 25 Hübe/min gesenkt wurde.

Wie bei der ersten Versuchsreihe wurden jeweils zwei Proben vom utg-Streifen V51 und V110 mit einer Dicke von zwei Millimetern verwendet.

Auch hier wurde wieder jeweils ein Durchgang ausgehend vom Substratmaterial beziehungsweise vom Aufgussmaterial geprüft.

Die Ergebnisse in Abbildung 59 und 60 zeigen, dass der Dehnungsverlauf sowie die Trendlinie deutlich größer als bei der ersten Versuchsreihe sind.

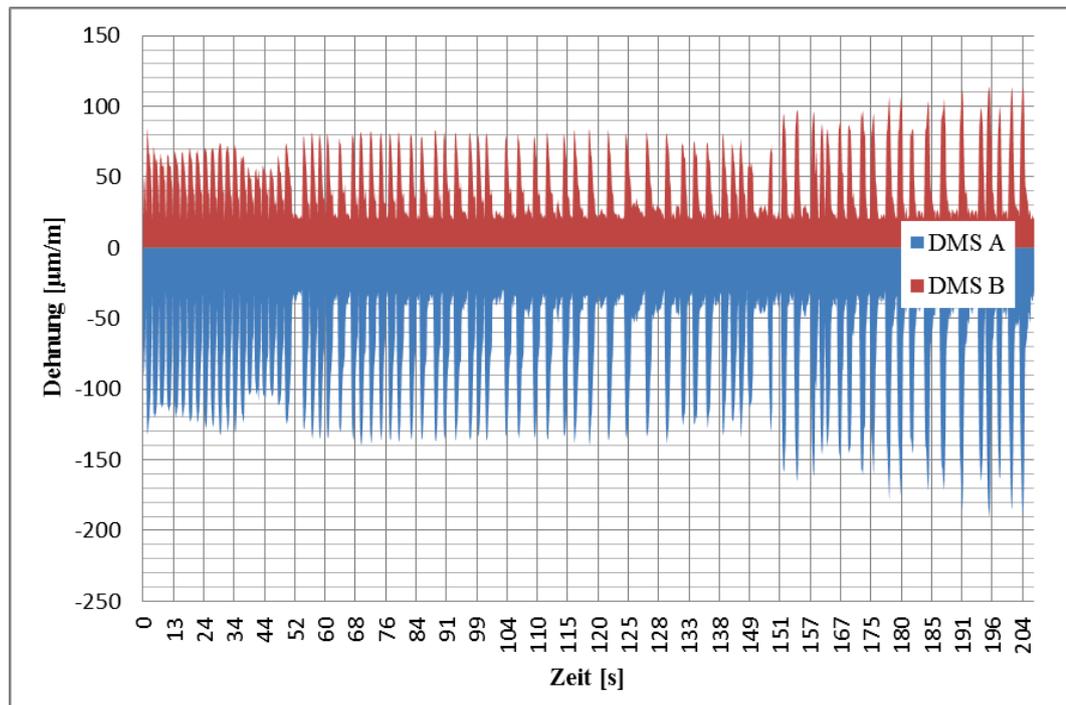


Abbildung 59) Stoßversuch V110-ZV3.1

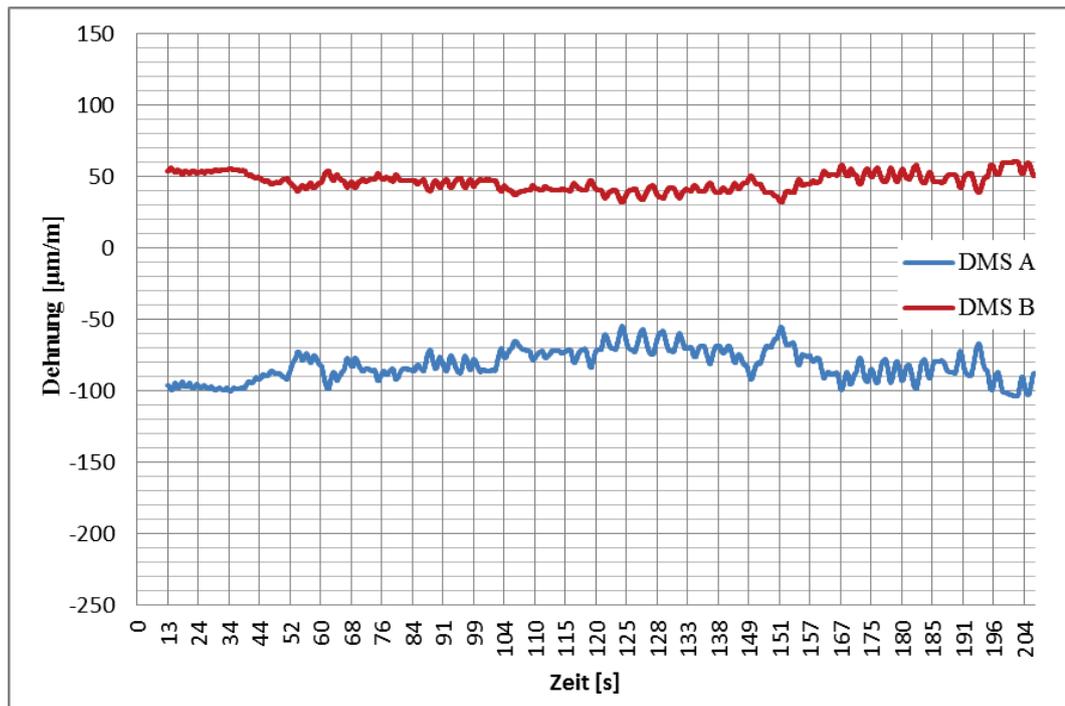


Abbildung 60) Trendlinie Stoßversuch V110-ZV3.1

Die Verläufe der restlichen Proben zeigen ähnliche Ergebnisse und sind, wie auch eine Fotodokumentation der Proben, im Anhang D5 enthalten.

Ausgehend von den Ergebnissen der ersten beiden Versuchsreihen konnte festgestellt werden, dass eine qualitative Untersuchung der Verbunde mit Hilfe des Stoßversuchs möglich ist. Des Weiteren konnte die Homogenität der Legierungen geprüft werden.

Da eine Reduktion der Prüfgeschwindigkeit sowie eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit schwer zu interpretierende Ergebnisse lieferte, sind für die Stoßprüfung eine Probendicke von zwei Millimetern sowie eine Hubgeschwindigkeit von 50 Hüben/Minute (Vorschub: 0,1mm/Hub) zu verwenden.

## 4.7. Korrelation der Ergebnisse

Nach Abschluss aller Materialprüfungen wurden die Ergebnisse der verschiedenen Prüfmethode n gegenübergestellt. Hierbei sollten einerseits die quantitativen Verfahren miteinander verglichen werden, andererseits sollte eine Korrelation zwischen qualitativen und quantitativen Verfahren hergestellt werden.

Hierbei wurden folgende Verfahren miteinander verglichen:

Gegenüberstellung	1.Prüfverfahren	2.Prüfverfahren	3.Prüfverfahren
1.Gegenüberstellung	Zugscherversuch	Zugversuch	Wedge-Test
2.Gegenüberstellung	Zugversuch	Stoßversuch	
3.Gegenüberstellung	Zugversuch	Zentrifugentest	

Tabelle 28) Gegenüberstellung der Versuche

### Erste Gegenüberstellung:

Die Werte des Zugscherversuchs wurden im Rahmen der Dissertation von Herrn Dipl.-Ing. Martin Wimmer, am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der technischen Universität München, ermittelt [23].

Die Gegenüberstellung von Zugscherversuch und Zugversuch sowie Wedge-Test in der folgenden Abbildungen 61 zeigt, dass bei allen drei Prüfmethode n eine Unterscheidung zwischen guten und schlechten Ergebnissen möglich ist.

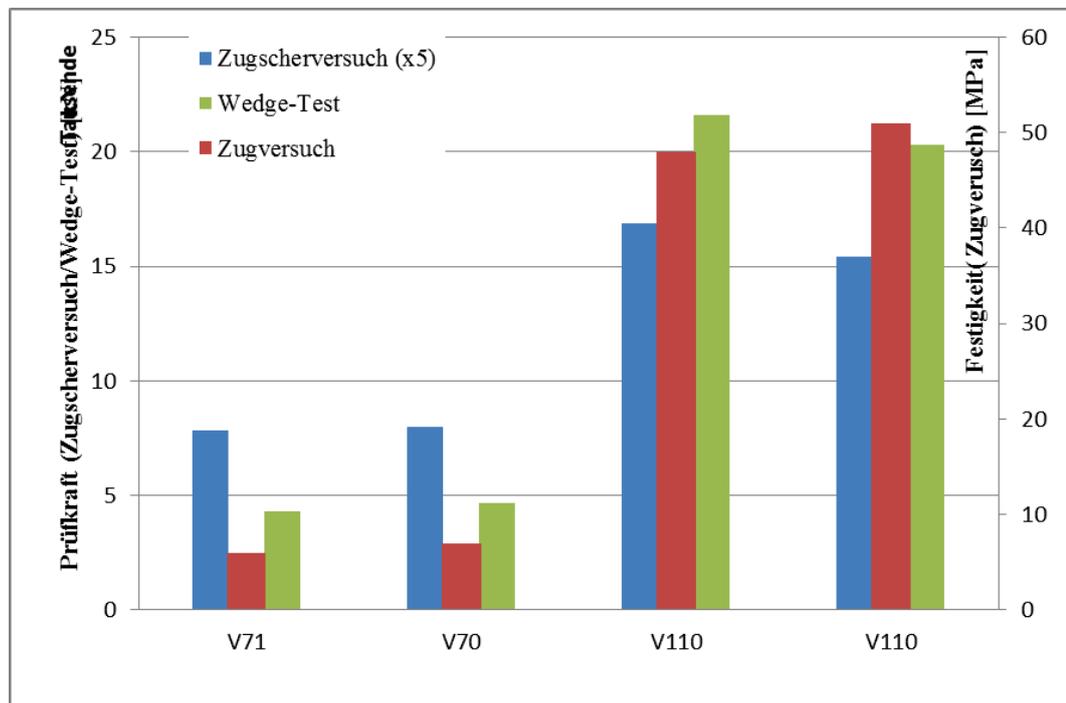


Abbildung 61) Korrelation Zugscherversuch/Zugversuch/Wedge-Test Teil 1

Beim Vergleich der Ergebnisse aus dem Zugversuch mit den Ergebnissen des Zugscherversuchs hat sich gezeigt, dass obwohl bei den Zugscherproben lediglich die Prüfkraft angegeben waren, bei einem Großteil der Versuche ein direkter Zusammenhang festgestellt werden kann.

Mit den Ergebnissen aus dem Wedge-Test ist dies, wie in Abbildung 62 ersichtlich ist, nicht möglich.

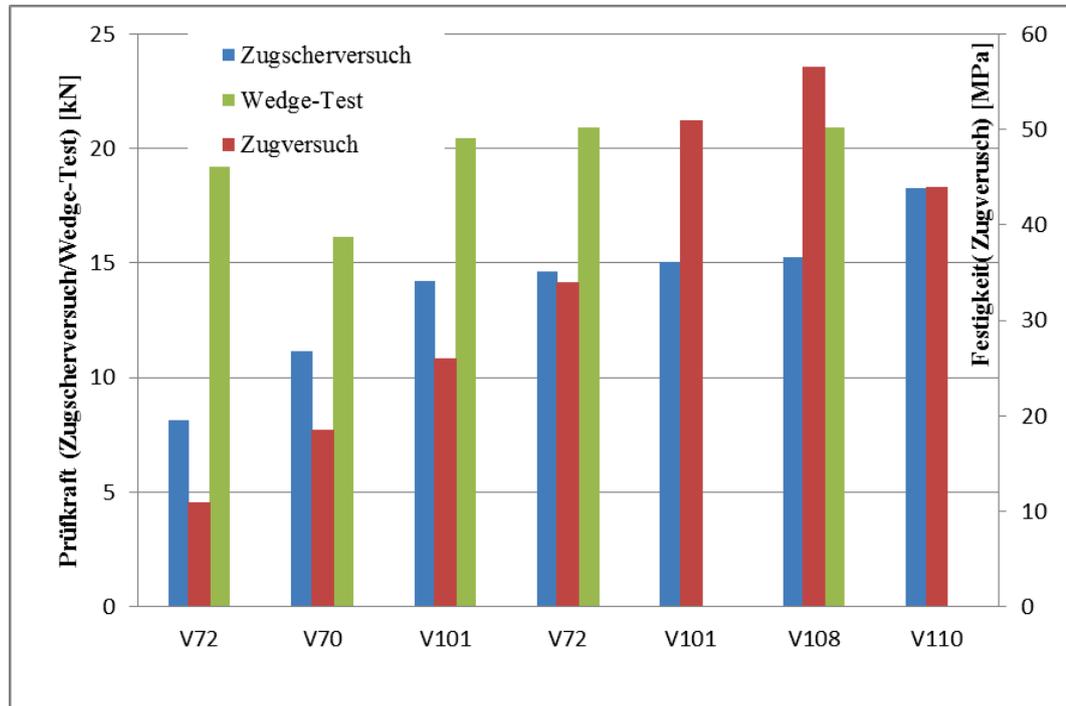


Abbildung 62) Korrelation Zugscherversuch/Zugversuch/Wedge-Test Teil 2

Ein Vorteil des Zugversuchs ist, dass ein tatsächlicher Haftfestigkeitswert angegeben werden kann, wohingegen beim Scherversuch nur eine Scherfestigkeit ermittelt wird.

In Bezug auf den Wedgetest kann man feststellen, dass hier nur eine qualitative Aussage hinsichtlich der Haftung möglich ist. Bei Haftzugfestigkeiten größer 20MPa kann zwischen den einzelnen Proben kein Unterschied mehr festgestellt werden.

### Zweite Gegenüberstellung:

Im Rahmen einer zweiten Gegenüberstellung wurden Stoßversuch und Zugversuch verglichen. Da beim Stoßversuch lediglich die Durchführbarkeit der Versuche relevant war, wurde nur eine gut und eine schlecht haftende Probe verwendet. Da beim Stoßversuch keine Zahlenwerte sondern lediglich ein Schnittkraftverlauf vorliegt, ist nur eine Unterscheidung zwischen gut und schlecht möglich. Hierbei zeigte sich, dass V51 der laut Zugversuch eine geringe Haftfestigkeit und im Stoßversuch einen Krafrückgang im Bereich der Bindezone aufweist, wohingegen V110, der wiederum im Zugversuch die höchste Haftfestigkeit aufweist diesen Rückgang nicht besitzt. Es ist somit möglich eine schlechte von einer guten Probe zu unterscheiden.

## V51 – Schlechte Haftfestigkeit

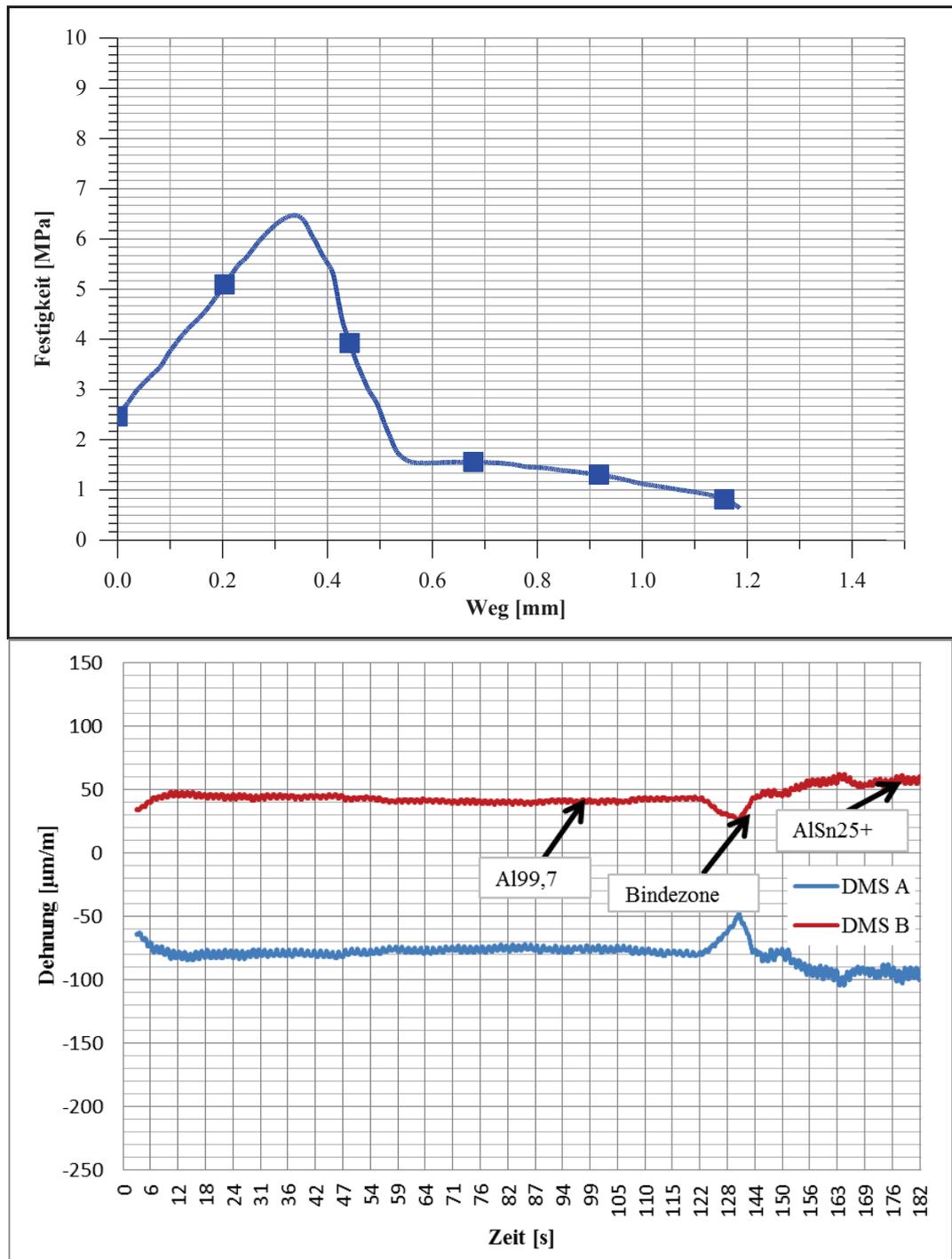


Abbildung 63) Ergebnisse Zugversuch V51-2C vs. Stoßversuch V51-5

## V110 – Gute Haftfestigkeit

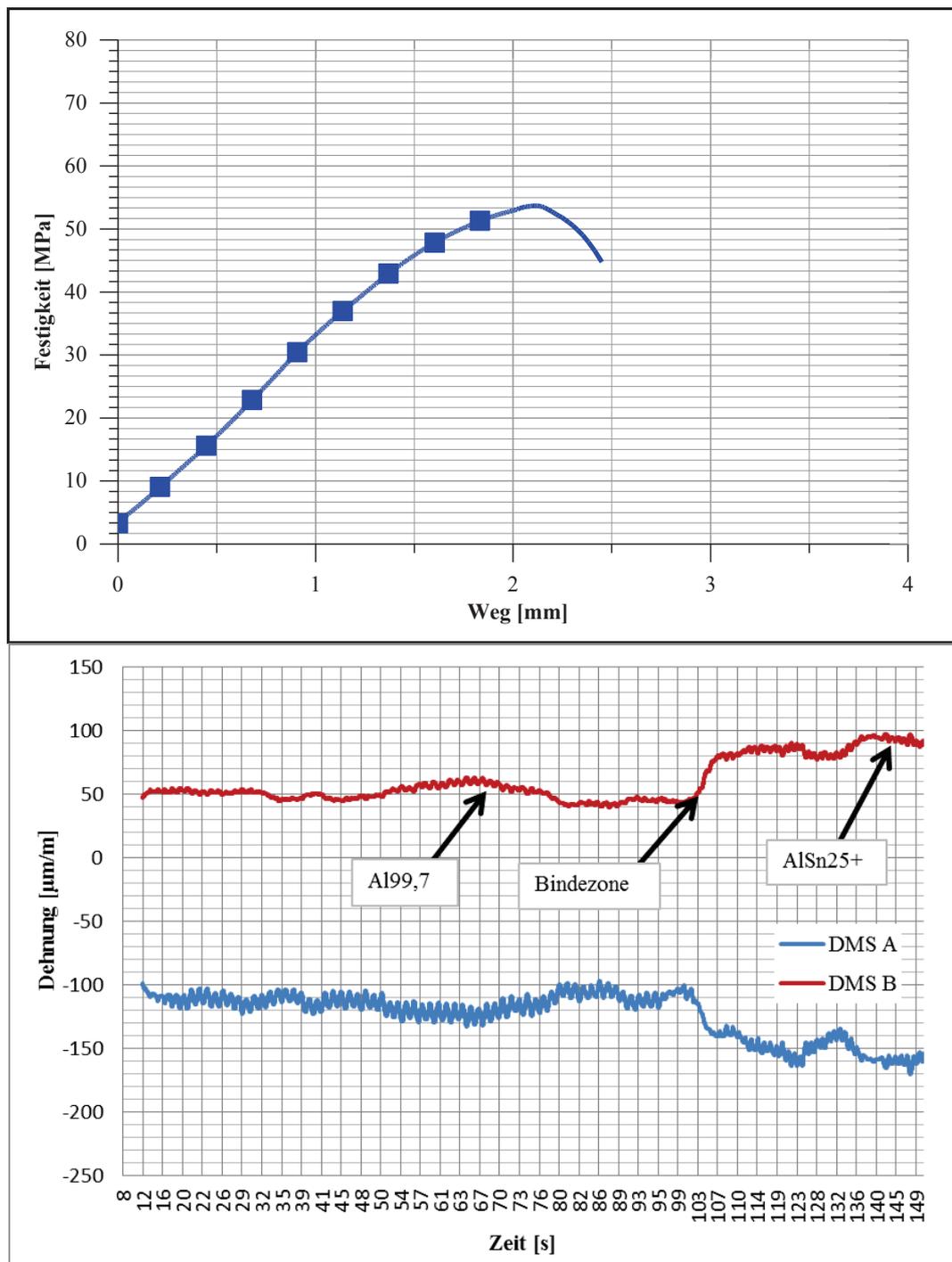


Abbildung 64) Ergebnisse Zugversuch V110 vs. Stoßversuch V110-SV1.08

Für weitere Aussagen hinsichtlich der Korrelation von Proben mit einer mittleren Haftfestigkeit sind weitere Versuche mit einer noch störungsfreieren Datenaufzeichnung notwendig.

### Dritte Gegenüberstellung:

Bei der dritten Gegenüberstellung wurden zwei Verfahren gegenübergestellt, die jeweils quantitative Haftfestigkeitsergebnisse liefern. Während beim Zentrifugentest über die Umdrehungszahl auf die Zugkraft und schlussendlich auf eine Zughaftfestigkeit umgerechnet wird, zeichnet man beim Zugversuch direkt die Zugkraft auf und kann diese an ihrem Maximum über die Prüffläche in die Zughaftfestigkeit umrechnen.

Bei der Gegenüberstellung wurden die Proben V51 und V110 des utg-Materials sowie die Proben VGM84 des Miba-Verbundgussmoduls verwendet.

Aus den Proben des Zentrifugentests wurde der Mittelwert gebildet und anschließend mit dem Mittelwert des Zugversuchs verglichen. Hierbei traten folgende Ergebnisse auf:

Versuchsnummer	Ergebnisse	
	Zentrifugentest	Zugversuch
Nr.	[MPa]	[MPa]
V110	32	62
V51	14	23
VGM84	15	28

**Tabelle 29) 3.Gegenüberstellung-Originale Werte**

Da bei V110 im Zentrifugentest lediglich das Gewinde versagt hat ist der, in der Tabelle 29 angegebene Wert, nicht mit dem Wert aus dem Zugversuch vergleichbar. Auch die Werte von V51 sowie VGM84 sind zu hinterfragen, da bei einigen Proben, wie bereits in den Ergebnissen in Abschnitt 4.4 erwähnt, ein Versagen im Freistich des Gewindes auftrat. Würde man hier bei diesen Proben den errechneten Wert betrachten, so würde die Gegenüberstellung folgendermaßen aussehen:

Versuchsnummer	Ergebnisse	
	Zentrifugentest	Zugversuch
Nr.	[MPa]	[MPa]
V51	29	23
VGM84	32	28

**Tabelle 30) 3.Gegenüberstellung-Angepasste Werte**

Wie in der Tabelle 30 ersichtlich liegen die Werte nun leicht über denen des Zugversuchs. Wenn man nun davon ausgeht, dass sich der tatsächliche Wert sich zwischen dem Minimalwert der Originaldaten und dem Maximalwert der angepassten Daten bewegt, so sind annähernd gleiche Ergebnisse zu erwarten.

Da die Prüfung mit der Zentrifuge noch nicht ausgereift ist, sind die hier gewonnenen Erkenntnisse im Rahmen von weiteren Versuchen zu verifizieren. Insbesondere die Probenaufnahme, Probengeometrie und die Prüfparameter (Drehzahl) sind weiter zu optimieren. Tendenziell zeigen die Ergebnisse den gleichen Trend, wie die der Zugversuche.

## **5. Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse**

Ziel dieser Arbeit war es eine Prüfmethode für die quantitative Messung der Haftfestigkeit eines gießtechnisch hergestellten Aluminium-Verbundes zu finden. Im Rahmen der Literaturrecherche wurden bereits vorhandene Haftfestigkeits-Prüfverfahren evaluiert sowie neue Prüfstrategien erarbeitet.

Im Rahmen dieser Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass alle ausgewählten Prüfverfahren ein der Literatur entsprechendes Ergebnis hinsichtlich der Haftfestigkeitsunterscheidung liefern.

Bei den Zugversuchen hat sich gezeigt, dass eine Prüfung, bis zu Haftfestigkeiten welche unterhalb der Zugfestigkeit des schwächeren Reinmaterials liegen, durchführbar ist. Bei diesem Versuch hat sich gezeigt, dass besonders auf die Einspannung der Probe zu achten ist, da hier eine Vorschädigung sehr leicht passieren kann. Diese kann im Verlauf des Zugversuchs eine Kerbe darstellen, die, wie in der Literatur von Weißbach angeführt wird, zu einem mehrachsigen Spannungszustand und somit zu Spannungsspitzen im Werkstoff führen kann [42].

Im Rahmen der Versuche konnte festgestellt werden, dass bei Proben mit einer niedrigen Haftfestigkeit ein Versagen beziehungsweise eine Vorschädigung beim Einbau in die Prüfmaschine sehr wahrscheinlich ist. Haftfestigkeitswerte unter 10MPa sind aus diesem Grund in der Auswertung nicht zulässig.

Im Verlauf der Zugprüfung an Proben mit einer Dicke von 5mm konnte festgestellt werden, dass die Klemmkraft der Probenhalterung nicht mehr ausreichend war, und es dadurch zu einem Abrutschen der Probe kam. Auf Grund dieser Tatsache ist anzuraten, Proben mit einer Dicke von 3mm zu verwenden, da hier die notwendige Klemmkraft kleiner ist. Da sich dadurch die Probenfläche reduziert ist eine größere Anzahl an Proben zu entnehmen, um statistisch dieselbe beziehungsweise eine größere Prüffläche zu erhalten, und somit die Aussagekraft zu erhöhen. Sehr vorteilhaft sind die simple Probengeometrie, die einfache Probenherstellung, sowie die rasche Versuchsdurchführung.

Bei den Zentrifugentests hat sich gezeigt, dass die Schwachstelle bei guter Haftung im Gewindegang bzw. im Freistich liegt. Dieser Effekt wird in der Literatur von Wittel H. et al im Buch „Roloff/Matek Maschinenelemente“ im dritten beziehungsweise elften Kapitel betrachtet [43]. Eine Erhöhung des Gewindedurchmessers brachte hier keine Verbesserung. Um auch diese Proben prüfen zu können, ist es im Rahmen der weiteren Forschungsarbeit erforderlich eine Neukonstruktion der Probenhalterung sowie des Prüfgewichts vorzunehmen.

Als Vorteil dieses Verfahrens haben sich die einfache Bedienung des LumiFrac sowie der spannungsfreie Probeneinbau herausgestellt. Ein weiterer Vorzug ist die Tatsache, dass in einem Prüfdurchgang bis zu acht Proben gleichzeitig geprüft werden können. Auf Grund

der Tatsache, dass bei diesem Versuch eine minimale Aufgussdicke von 3mm vorausgesetzt wird, können auch Proben die im Zugversuch nicht mehr eingespannt werden können, geprüft werden.

Hinsichtlich der Probenerstellung ist zu beachten, dass möglichst wenig Belastung auf die Bindezone eingebracht wird. Eine entsprechende Fertigungsvorschrift wäre zu erarbeiten. Da auf dieser Anlage auch zyklische sowie thermische Versuche durchgeführt werden können, wäre auch eine Überprüfung der Haftfestigkeit hinsichtlich der Belastungen im Einsatz möglich. Des Weiteren wird eine Detektion des Kraftverlaufs in Zukunft realisierbar sein.

Mit Hilfe des Wedge-Tests kann die Qualität der Haftung schnell und mit geringem Aufwand überprüft werden.

Während bei den anderen Verfahren eine relativ kleine Fläche überprüft wird, ist die Prüffläche beim Wedge-Test mit ca. 30-50mm<sup>2</sup> vergleichsweise groß.

Als Vorteil des Wedge-Test-Verfahrens hat sich herausgestellt, dass die Probenherstellung mit einfachen Mitteln an einer Bandsäge durchgeführt werden kann. Bei der Positionierung des Prüfkeils ist darauf zu achten, dass die Schneide des Keils auf der Bindezone liegt. Hierfür muss die Oberfläche, mit beispielsweise erosiven Verfahren, so behandelt werden, dass die Bindezone erkennbar ist.

Sowohl auf die Schneide als auch auf den gesamten Keil werden bei der Prüfung starke Belastungen aufgebracht. Aus diesem Grund ist dieser in regelmäßigen Abständen zu überprüfen und gegebenenfalls zu ersetzen. Im Zuge der Versuche hat sich gezeigt, dass ein randschichtnitrierter Keil mit der im Anhang B dargestellten, Geometrie für die Prüfung geeignet ist.

Die Eindringtiefe des Keils ist mit zehn Millimetern zu beschränken, um die Belastungen auf den Prüfkeil zu reduzieren und einen Ausbau der Probe garantieren zu können.

Der Wedge-Test hat gezeigt, dass eine Unterscheidung der Haftfestigkeit nur qualitativ möglich ist.

Im Rahmen der Stoßversuche wurde anfangs nur die Durchführbarkeit betrachtet. Hierbei konnte festgestellt werden, dass auch dieses Verfahren als qualitative Untersuchungsmethode verwendbar ist. Mit Hilfe dieses Verfahrens kann auch die Homogenität, beziehungsweise die Qualität des Substrats, sowie der Aufgusslegierung analysiert werden.

Die Probenherstellung ist ähnlich der Zugprobenherstellung und kann mit Hilfe von erosiven Herstellverfahren durchgeführt werden. Um die Messdatenaufzeichnung zu verbessern ist ein fix installierter Kraftaufnehmer dem Dehnmessstreifen vorzuziehen. Auch die Platzierung der Anlage hinsichtlich der Abschirmung zu Störquellen spielt auf Grund der Empfindlichkeit des Messkraftverstärkers eine ausschlaggebende Rolle. Im Rahmen weiterer Versuche sollte die Genauigkeit des automatischen Vorschubs untersucht werden.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass sowohl bei den Zentrifugentests als auch bei den Zugversuchen qualitative als auch quantitative Ergebnisse erzielt werden konnten. Der Wedge-Test sowie die Stoßversuch lieferten im Vergleich zu den beiden bereits genannten Verfahren ein rein qualitatives Ergebnis.

Im Rahmen der Korrelation der Versuche, konnte festgestellt werden, dass die Ergebnisse die in dieser Arbeit erzielt wurden, sowohl untereinander als auch mit den Ergebnissen der Zugscherprüfung, die im Rahmen der Dissertation von Wimmer durchgeführt wurden, übereinstimmen [23]. Da bei der Zugscherprüfung die Haftscherfestigkeit ermittelt wird, sind der Zugversuch beziehungsweise der Zentrifugentest vorzuziehen, da hier ein direkter Haftfestigkeitswert ermittelt wird. Ein weiterer Vorteil der hier erarbeiteten Prüfverfahren ist die, im Vergleich zum Zugscherversuch, einfache Probenherstellung.

Resultierend aus den vorliegenden Ergebnissen sind für die zukünftige Materialprüfung der gießtechnisch hergestellten Aluminiumverbunde, der Zugversuch sowie der Zentrifugentest zu verwenden. Wenn nur qualitative Daten benötigt werden, so kann der Wedge-Test als eine Art Schnelltest verwendet werden.

Bei beiden Versuchen kann ein direkter Haftfestigkeitswert ermittelt werden. Auf Grund der Tatsache, dass sich der Zentrifugentest, hinsichtlich der Prüfung von Metall-Metall-Verbunden, noch in der Entwicklungsphase befindet, sind Änderungen der Probengeometrie, Probenhalterung sowie der Kraftaufzeichnung vorzunehmen.

## **6. Ausblick**

Zum momentanen Zeitpunkt befindet sich das Verbundgussverfahren in der Firma Miba Gleitlager GmbH noch in der Entwicklungsphase. Daher ist eine Aussage hinsichtlich der Serientauglichkeit der Prüfverfahren noch zu früh. Zur Begleitung des Entwicklungsprozesses sowie zur vergleichenden Materialprüfung wird im Zuge der Prozessentwicklung in Zukunft der Zugversuch, sowie als Schnelltest der Wedge-Test, im Rahmen der in dieser Arbeit entwickelten Form, verwendet werden.

Auf Grund der Tatsache, dass sich der Zentrifugentest noch in der Entwicklungsphase befindet, ist eine Kooperation zwischen der Firma LUM GmbH sowie der Miba Gleitlager GmbH angedacht, um das Prüfverfahren hinsichtlich der Anforderung an eine spätere serientaugliche Prüfung weiter zu optimieren. Hierbei muss sowohl eine Probenaufnahme als auch die Kraftaufzeichnung weiterentwickelt und anschließend getestet werden. Für die spätere Serienfertigung wäre insbesondere das Zentrifugen-Verfahren zu empfehlen, da hier relativ einfach 8 Proben zeitgleich geprüft werden können. Ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens, ist die einfache Bedienung des Geräts, was den Einsatz in einer Produktionsumgebung ermöglichen würde.

Bei allen drei Verfahren ist zusätzlich im Rahmen einer Messsystemanalyse die optimale Probenanzahl für die Prüfung zu bestimmen.

## 7. **Begriffserklärung**

### **Adhäsionsbruch**

Bei einem Adhäsionsbruch, löst sich bei der Haftfestigkeitsprüfung der Klebstoff von der Haftfläche des Untergrunds.

### **Aufgussmaterial**

Bezug nehmend auf den Verbundguss bezeichnet man beim Aufgussmaterial jenen Werkstoff, der im flüssigen Zustand auf einen zweiten, teilweise oder komplett erstarrten Werkstoff aufgegossen wird.

### **Beltcaster**

Beim Beltcaster handelt es sich um eine Stranggussanlage, bei der die Form des Stranges über ein umlaufendes Endlos-Band festgelegt wird.

### **Bindefolie**

Aluminium-Zinn-Lagermetalle und Stahlstützkörper haben oft stark unterschiedliche Eigenschaften und können somit nicht direkt miteinander verbunden werden. Aus diesem Grund bedarf es eines dritten Materials das sich zwischen Lagermetall und Stahlstützkörper befindet. Diese Bindefolie kann auf Grund ihrer Eigenschaften sowohl mit dem Stahl als auch mit dem Lagermetall eine Verbindung eingehen. Da diese Folie nur zur Verbindung der Materialien gedacht ist, ist sie in den meisten Fällen nur wenige zehntel Millimeter dick.

### **Design of Experiment = statistische Versuchsplanung**

Bei der statistischen Versuchsplanung werden im Rahmen von einem Versuch gleich mehrere relevante Faktoren verändert. Dies beruht auf der Tatsache, dass auf Grund des großen Aufwands nicht alle Faktoren einzeln geändert werden können. Ziel ist es die Versuchsanzahl zu minimieren und durch Rückschlüsse ein aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten.

### **Durchschmelzen**

Beim Durchschmelzen wird das Substratmaterial von der Aufgussfläche bis zur Bodenfläche aufgeschmolzen. Dabei kommt es zum Vermischen der beiden Legierungen. Eine Unterscheidung der unterschiedlichen Werkstoffe ist nach dem Durchmischen oft nicht mehr möglich.

### **Gleitlagerprüfstand**

Am Gleitlagerprüfstand werden die Betriebsbedingungen eines Gleitlagers im Motor nachgestellt.

### **Haftfestigkeit**

Als Haftfestigkeit bezeichnet man jene Kraft, die notwendig ist um zwei Materialien, die an einer vordefinierten Fläche aneinander haften, zu trennen. Die Kraft wirkt normal zur Haftfläche.

### **Kohäsionsbruch**

Von einem Kohäsionsbruch spricht man dann, wenn bei der Prüfung einer Klebung der Untergrund versagt.

### **Lagermetall**

Als Lagermetall bezeichnet man beim Gleitlager jene Metallschicht, die im Betrieb in Kontakt mit der rotierenden Welle steht. Zwischen Lagermetall und Welle befindet sich im Betriebszustand ein Schmierfilm. Um optimale Gleiteigenschaften zu erreichen werden auf das Lagermetall oftmals noch weitere Laufsichten (zum Beispiel Sputter- oder Synthes®-Schichten) aufgebracht.

### **Mischbruch**

Beim Mischbruch handelt es sich um eine Kombination aus Kohäsions- und Adhäsionsbruch. Hierbei tritt das Versagen sowohl in einem der beiden Materialien als auch im Klebstoff auf.

### **Prüfdummy**

Als Prüfdummy bezeichnet man einen Probenkörper mit vordefinierter Geometrie und Gewicht. Dieser Probenkörper wird im Rahmen des Versuchs nicht zerstört sondern dient rein zum Ausgleich von auftretender Unwucht beim Zentrifugentest. Die notwendige Symmetriebedingung wird durch Einbau eines Prüfdummies erfüllt.

### **Sandwichplattieren**

Als Sandwich wird der Verbund zwischen Lagermetall und Bindefolie bezeichnet. Oft wird auch der Begriff Vorverbund verwendet. Beim Sandwichplattieren wird mit Hilfe von umformtechnischen Verfahren wie zum Beispiel Walzen ein Verbund zwischen Sandwich und Bindefolie hergestellt.

### **Scherhaftfestigkeit**

Anders als bei der Haftfestigkeit wird bei der Scherhaftfestigkeit jener Wert betrachtet, der notwendig ist, um zwei Materialien mit einer vordefinierten Haftfläche voneinander zu trennen. Die Prüfkraftrichtung liegt hierbei in der Haftfläche.

### **Sputter-Schicht**

Beim Sputtern wird ein Kathodenmaterial durch Beschuss mit energiereichen Ionen zerstäubt. Dieses zerstäubte Material setzt sich anschließend an das zu beschichtende Material ab. Die dabei entstehende Schicht wird als Sputter-Schicht bezeichnet.

### **Stahlstützkörper**

Als Stahlstützkörper wird die Trägerschicht des Gleitlagers bezeichnet. Während das Lagermetall der rotierenden Welle zugewandt ist, befindet sich der Stahlstützkörper auf der Wellen-abgewandten Seite. Der Stahl gibt dem Gleitlager die notwendige Festigkeit.

### **Substrat**

Bezug nehmend auf den Verbundguss bezeichnet man beim Substrat jenen Werkstoff, der als erstes gegossen wird. Beim Verbundgießen wird dieser Werkstoff durch das Aufgussmaterial oberflächlich erneut aufgeschmolzen. Dadurch wird ein Verbund hergestellt.

### **Synthec®-Schicht**

Bei der Synthec®-Schicht handelt es sich um eine Lackschicht, welche auf das Lagermetall aufgebracht wird. Durch diese Schicht können die tribologischen Eigenschaften des Gleitlagers verbessert werden.

### **Uniaxialer Spannungszustand**

Beim Uniaxialen oder einachsigen Spannungszustand wird der Prüfkörper nur entlang einer Achse im dreidimensionalen Raum belastet. Beim Zugversuch zur Haftfestigkeitsanalyse ist dies die Normalkraft zur Prüffläche.

## **Vorverbund**

Als Vorverbund wird der Verbund zwischen Lagermetall und Bindefolie bezeichnet. In der Literatur ist dieser Begriff auch unter der Bezeichnung Sandwich zu finden.

## **8. Literaturverzeichnis**

- [1] Schmid E., Weber R.: Gleitlager. Berlin [u.a.]: Springer, 1953, ISBN 9-783-64286-8740
- [2] Grote K., Feldhusen J.: Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau. Dordrecht: Springer-Verlag, 2007. Kapitel 5
- [3] Basshuysen Rv.: Siemens-VDO Automotive AG (Regensburg), Lexikon Motorentechnik: Der Verbrennungsmotor von A – Z. Wiesbaden: Vieweg, 2004.
- [4] Miba Gleitlager GmbH: Bearing Manual. Miba Bearing Group, 2006
- [5] Miba Gleitlager GmbH: Bearing Engineering Academy Intake III Modul A. Miba Bearing Group, 2008
- [6] Grün F.: Tribologisches Verhalten von Gleitlagerwerkstoffen. Dissertation: Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau, Montanuniversität Leoben, 2009
- [7] Langbein F., Mergen R.: Ein neuer Aluminiumlagerwerkstoff-Wettbewerb der höherfesten Gleitlagersysteme. In: Chimani / Fragner / Uggowitz / Wahlen, 6.Ranshofner Leichtmetalltage: LKR 2010, ISBN: 978-3-902092-06-9, S.125-139
- [8] Grün F., Gódor I., Gärtner W., Eichlseder W.: Tribological performance of thin overlays for journal bearings. Tribol Int. 2010, 2011, 44(11):1271
- [9] Schmidtchen M.: Walzplattieren von flächigen Mehrlagenverbunden-Experiment und Theorie. MEFORM 2004 Tagungsband; 2004, S.29-52
- [10] Langbein F. et al.: Aluminium Gleitlager der Zukunft – Innovation durch einen neuen Halbzeug Fertigungsprozess. In: Chimani / Kraly /, 8.Ranshofner Leichtmetalltage: LKR 2014, ISBN: 978-3-902092-08-3, S.60-73
- [11] Marukovich E.I. et al.: Study on the possibility of continuous-casting of bimetallic components in condition of direct connection of metals in liquid state. Materials and Design 27, 2006, S.1016-1026
- [12] Buchner M.: Bestimmung der Einflussfaktoren auf die Haftfestigkeit von Aluminium-Stahl-Verbundblechen. Diplomarbeit: Lehrstuhl für Umformtechnik; Montanuniversität Leoben, 2008

- [13] Kanani N.: Moderne mess- und Prüfverfahren für metallische und andere anorganische Überzüge: Mit 23 Tabellen. Renningen: Expert-Verlag, 2007
- [14] Bartz WJ.: Selbstschmierende und wartungsfreie Gleitlager: Typen, Eigenschaften, Einsatzgrenzen und Anwendungen. Ehningen bei Böblingen: Expert-Verl, 1993.
- [15] Schmidtchen M., Hajduk D., Simecek P.: Die Haftfestigkeit von Walzplattierungen, deren Bestimmung und Simulation. MEFORM 2004 Tagungsband, 2004, S.81-110
- [16] Salentin S.: Prüfung der Haftfestigkeit durch den Schäl- / Scherversuch von Werkstoffverbunden. FH Wels, 2012
- [17] DIN EN 13144:2003-09, Metallische und andere anorganische Überzüge - Verfahren zur quantitativen Messung der Haftfestigkeit durch den Zugversuch. Deutsche Fassung EN 13144:2003
- [18] Doege E., Meyer-Nolkemper H, Saeed I: Fließkurvenatlas metallischer Werkstoffe: Mit Fließkurven für 73 Werkstoffe und einer grundlegenden Einführung. München, Wien: Hanser, 1986
- [19] DIN EN ISO 14272:2002-04, Probenmaße und Verfahren für die Kopfzugprüfung an Widerstandspunkt- und Buckelschweißungen mit geprägten Buckeln (ISO 14272:2000). Deutsche Fassung EN ISO 14272:2001
- [20] ISO 4386-2:2012-10, Gleitlager - Metallische Verbundgleitlager - Teil 2: Zerstörende Prüfung der Bindung für Lagermetall-Schichtdicken  $\geq 2$  mm. Ersatz für ISO 4386-2:1982-02
- [21] Koring R.: Gleitlagertechnik im Wandel: Praxis innovativer hydrodynamischer Gleitlager: mit 5 Tabellen. Renningen: expert-Verl, 2010.
- [22] DIN EN 14869-2:2011-07, Strukturklebstoffe - Bestimmung des Scherverhaltens struktureller Klebungen - Teil 2: Scherprüfung für dicke Fügeile (ISO 11003-2:2001, modifiziert). Deutsche Fassung EN 14869-2:2011
- [23] Wimmer M.: Horizontales Stranggießen von Aluminium-Verbundbändern. unv. Dissertation: Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen, Technische Universität München, 2015

- [24] DIN 50162:1978-09, Prüfung plattierter Stähle; Ermittlung der Haft-Scherfestigkeit zwischen Auflagewerkstoff und Grundwerkstoff im Scherversuch.
- [25] Habenicht G.: Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009.
- [26] DIN EN 1464:2010-06, Klebstoffe - Bestimmung des Schälwiderstandes von Klebungen – Rollenschälversuch. Deutsche Fassung EN 1464:2010
- [27] ASTM D3762-03:2010, Standard Test Method for Adhesive-Bonded Surface Durability of Aluminum (Wedge Test). ASTM International. West Conshohocken, PA, 2010
- [28] Budzik M., Jumel J., Shanahan M.: An in situ technique for the assessment of adhesive properties of a joint under load. Int J Fract, 2011,171(2):111-24
- [29] Ratta V.: Crystallization, Morphology, Thermal Stability and Adhesive Properties of Novel High Performance Semicrystalline Polyimides. Dissertation: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1999
- [30] Böge A. Vieweg Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik; Mit 441 Tabellen. Wiesbaden: Vieweg, 2007, S.1035-1049
- [31] Reuter J.: Schnittkraftmessung an Stoßmaschine - Vorversuch zur Erprobung des Verfahrens. Untersuchungsbericht: 27442, Clausthal-Zellerfeld, 2008
- [32] Miba Gleitlager GmbH: Prüfanweisung Plattiererei-Haftungsprüfung an Stahl-Leichtmetall-Verbundmaterial. Miba Bearing Group, Internes Dokument, 2011
- [33] Beck U., Reiners G., Weise M., Lerche D., Rietz U., Niederwald H.: “Quantitative Adhesion Testing of PVD-Coatings by means of Centrifuge Technology”. Surface & Coatings Technology 205, 2011
- [34] Rietz U.: “Methodische und experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung der Haftfestigkeit von Klebstoffen mittels des Zentrifugenprinzips“. Diplomarbeit an der FHTW Berlin, 2008

- [35] LUM GmbH: Adhesion Analyser – LUMiFrac - Evaluate the strength of your composite materials. LUM GmbH, 2014
- [36] Mooney T.: Hard Chrome Plating Bond Strength and Test Methods: Modified Ollard Test. <http://www.finishing.com/180/02.shtml>, 12.02.2015
- [37] Langbein F.: Miba Verbundgussmodul - Status Juli 2013. Miba Bearing Group, Internes Dokument, 2011
- [38] Nerl C., Pintore M., Wimmer M.: Präsentation: Forschungsprojekt „HIPERBEAR 2.0“ 3.Gruppentreffen in Laakirchen. Miba Bearing Group, Internes Dokument, 2013
- [39] Rietz U.: Analysenbericht für Miba: 1.Untersuchungsbericht. LUM GmbH, Berlin, 2014
- [40] Rietz U.: Analysenbericht für Miba: 2.Untersuchungsbericht. LUM GmbH, Berlin; 2014
- [41] Maier B.: Fotodokumentation des Stoßversuchs in der Firma Miba Gleitlager. Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau, Montanuniversität Leoben, 2014
- [42] Weißbach W., Dahms M.: Werkstoffkunde: Strukturen, Eigenschaften, Prüfung. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2012.
- [43] Wittel H., Muhs D., Jannasch D., Voßiek J.. Roloff/Matek Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.
- [44] DIN EN ISO 6892-1:2009-12, Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur (ISO 6892-1:2009). Deutsche Fassung EN ISO 6892-1:2009
- [45] ISO 6279:2006-04, Plain bearings - Aluminium alloys for solid bearings.

## 9. Anhang

### 9.1. Anhang A - Probenentnahme

Proben des Verbundgussmoduls der Firma Miba Gleitlager						
VGM-Nr.	Stk	Substrat	Aufguss	Zustand	Versuch	Probenbezeichnung
VGM79	6	AlSn25+	AlCuMn+	Gusszustand	Zugversuch	VGM79-1, VGM79-2, VGM79-3 VGM79-4, VGM79-5, VGM79-6
VGM84	16	AlSn25+	AlCuMn+	Gusszustand	Zugversuch	VGM84-1, VGM84-2, VGM84-3, VGM84-4, VGM84-5 VGM84-6, VGM84-A, VGM84-B, VGM84-C, VGM84-D VGM84-E, VGM84-F, VGM84-G, VGM84-H, VGM84-I VGM84-J
	8			Gusszustand	Zentrifugentest	VGM84-1-ZT, VGM84-2-ZT, VGM84-3-ZT, VGM84-4-ZT VGM84-5-ZT, VGM84-6-ZT, VGM84-7-ZT, VGM84-8-ZT
VGM87	6	AlSn25+	AlCuMn+	Gusszustand	Zugversuch	VGM87-1, VGM87-2, VGM87-3 VGM87-4, VGM87-5, VGM87-6
VGM88	6	AlSn25+	AlCuMn+	Gusszustand	Zugversuch	VGM88-1, VGM88-2, VGM 88-3 VGM88-4, VGM88-5, VGM88-6
VGM89	6	AlSn25+	AlCuMn+	Gusszustand	Zugversuch	VGM89-1, VGM89-2, VGM89-3 VGM89-4, VGM89-5, VGM89-6
VGM92	9	AlSn25+	Al99,7	Gusszustand	Zugversuch	VGM92A-1, VGM92A-2, VGM92A-3 VGM92M-1, VGM92M-2, VGM92M-3 VGM92E-1, VGM92E-2, VGM92E-3
	9			Wärmebehandelt	Zugversuch	VGM92A_HT-1, VGM92A_HT-2, VGM92A_HT-3, VGM92M_HT-1, VGM92M_HT-2, VGM92M_HT-3, VGM92E_HT-1, VGM92E_HT-2, VGM92E_HT-3
VGM93	6	AlSn25+	Al99,7	Gusszustand	Zugversuch	VGM93A-1, VGM93A-2, VGM93A-3 VGM93M-1, VGM93M-2, VGM93M-3
	6			Wärmebehandelt	Zugversuch	VGM93A_HT-1, VGM93A_HT-2, VGM93A_HT-3, VGM93M_HT-1, VGM93M_HT-2, VGM93M_HT-3,
VGM94	9	AlSn25+	Al99,7	Gusszustand	Zugversuch	VGM94A-1, VGM94A-2, VGM94A-3 VGM94M-1, VGM94M-2, VGM94M-3 VGM94E-1, VGM94E-2, VGM94E-3
	9			Wärmebehandelt	Zugversuch	VGM94A_HT-1, VGM94A_HT-2, VGM94A_HT-3, VGM94M_HT-1, VGM94M_HT-2, VGM94M_HT-3, VGM94E_HT-1, VGM94E_HT-2, VGM94E_HT-3
VGM96	9	AlSn25+	Al99,7	Gusszustand	Zugversuch	VGM96A-1, VGM96A-2, VGM96A-3 VGM96M-1, VGM96M-2, VGM96M-3 VGM96E-1, VGM96E-2, VGM96E-3
	6			Wärmebehandelt	Zugversuch	VGM96A_HT-1, VGM96A_HT-2, VGM96A_HT-3, VGM96M_HT-1, VGM96M_HT-2, VGM96M_HT-3,
VGM97	9	AlSn25+	Al99,7	Gusszustand	Zugversuch	VGM97A-1, VGM97A-2, VGM97M-1, VGM97M-2, VGM97M-3 VGM97E-1, VGM97E-2, VGM97E-3
	9			Wärmebehandelt	Zugversuch	VGM97A_HT-2, VGM97A_HT-3, VGM97M_HT-1, VGM97M_HT-2, VGM97M_HT-3, VGM97E_HT-1, VGM97E_HT-2, VGM97E_HT-3
VGM101	6	Al99,7	AlSn25+	Gusszustand	Zugversuch	VGM101-1, VGM101-2, VGM101-3 VGM101-4, VGM101-5, VGM101-6

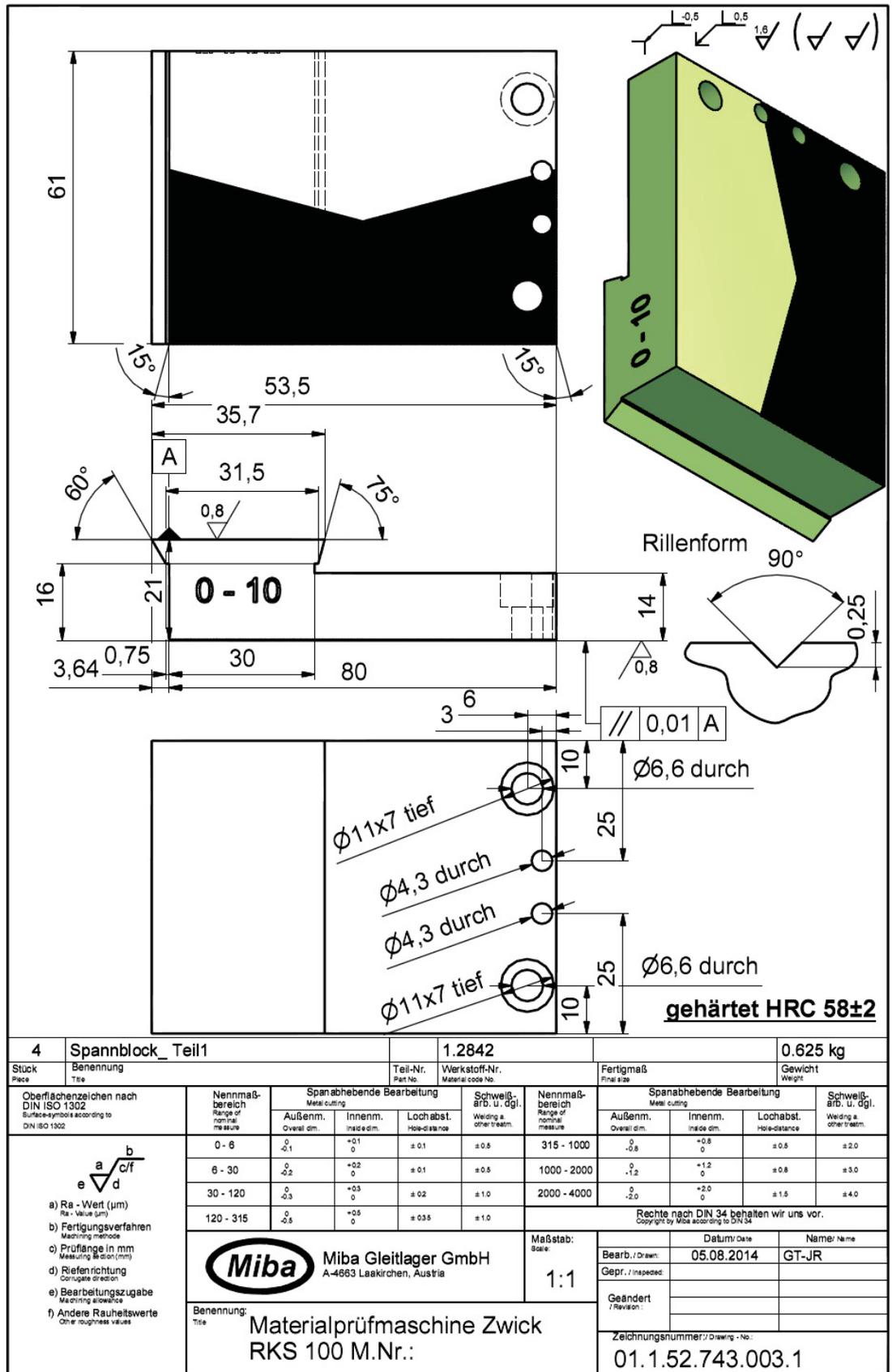
Tabelle 31) Probendokumentation Verbundgussmodul-Material

Proben des Verbundgussmoduls des utg München							
utg-Nr	Stk	Substrat	Aufguss	Gussgeschwindigkeit	Zustand	Versuch	Probenbezeichnung
V51	16	AlSn6	Al	200	Gusszustand	Zentrifugentest	V51-1, V51-2, V51-3, V51-4, V51-5, V51-6, V51-7, V51-8, V51-9, V51-10, V51-11, V51-12, V51-13, V51-14, V51-15 V51-16
	16					Zugversuch	ZV51-1, ZV51-2, ZV51-3, ZV51-4, ZV51-5, ZV51-6, ZV51-7, ZV51-8, ZV51-9, ZV51-10, ZV51-11, ZV51-12 V51-2-A, V51-2-B, V51-2-C, V51-2-D
	5					Stoßversuch	SV51-1, SV51-2, SV51-3, SV51-4, SV51-5
V70	2	AlSn6	Al	235	Gusszustand	Wedge-Test	V70-1, V70-2
	4					Zugversuch	V70-1.1, V70-1.2, V70-2.1, V70-2.2
V70	2	AlSn6	Al	konti	Gusszustand	Wedge-Test	V70-3, V70-4
	4					Zugversuch	V70-3.1, V70-3.2, V70-4.1, V70-4.2
V71	2	AlSn6	Al	261	Gusszustand	Wedge-Test	V71-1, V71-2
	4					Zugversuch	V71-1.1, V71-1.2, V71-2.1, V71-2.2
V72	2	AlSn6	Al	235	Gusszustand	Wedge-Test	V72-1, V72-2
	4					Zugversuch	V72-1.1, V72-1.2, V72-2.1, V72-2.2
V72	2	AlSn6	Al	261	Gusszustand	Wedge-Test	V72-3, V72-4
	4					Zugversuch	V72-1.1, V72-1.2, V72-2.1, V72-2.2
V101	2	AlSn6	Al	261	Gusszustand	Wedge-Test	V101-1, V101-2
	4					Zugversuch	V101-1.1, V101-1.2, V101-2.1, V101-2.2
V101	2	AlSn6	Al	235	Gusszustand	Wedge-Test	V101-3, V101-4
	4					Zugversuch	V101-1.1, V101-1.2, V101-2.1, V101-2.2
V108	2	AlSn6	Al	261	Gusszustand	Wedge-Test	V108-1, V108-2
	4					Zugversuch	V108-1.1, V108-1.2, V108-2.1, V108-2.2
V110	6	AlSn6	Al	235	Gusszustand	Wedge-Test	V110-1, V110-2, V110-3, V110-4, V110-5, V110-6
	11					Stoßversuch	SV110-1.7, SV110-1.8, SV110-1.9, SV110-1.10, SV110-1.11, SV110-1.12, ZV110-3.1, ZV110-3.2, ZV110-3.9, ZV110-3.10, ZV110-3.11
	15					Zentrifugentest	V110-1, V110-2, V110-3, V110-5, V110-6 V110-7, V110-8, V110-9, V110-10, V110-11, V110-12 V110-13, V110-14, V110-15
	12					Zugversuch	V110-1.1, V110-1.2, V110-2.1, V110-2.2 V110-3.1, V110-3.2, V110-4.1, V110-4.2 V110-5.1, V110-5.2, V110-6.1, V110-6.2
V110	2	AlSn6	Al	261	Gusszustand	Wedge-Test	V110-7, V110-8
	4					Zugversuch	V110-7.1, V110-7.2, V110-8.1, V110-8.2

**Tabelle 32) Probendokumentation utg-Material**







U:\Diplomarbeit\Zeichnungen\01.1.52.743.003.1.lwd

Abbildung 67) Klemmblocke 80mm Teil 1

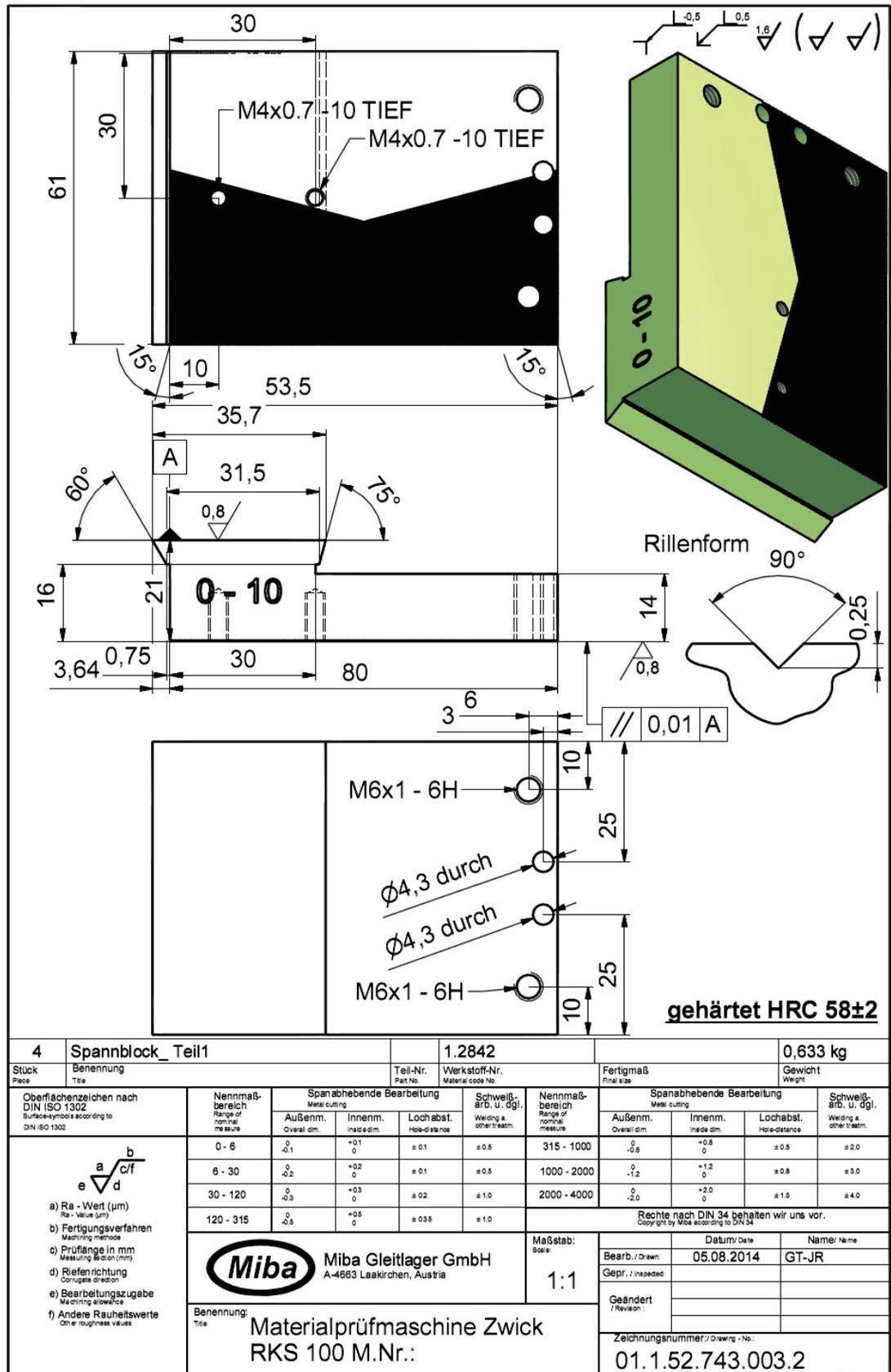
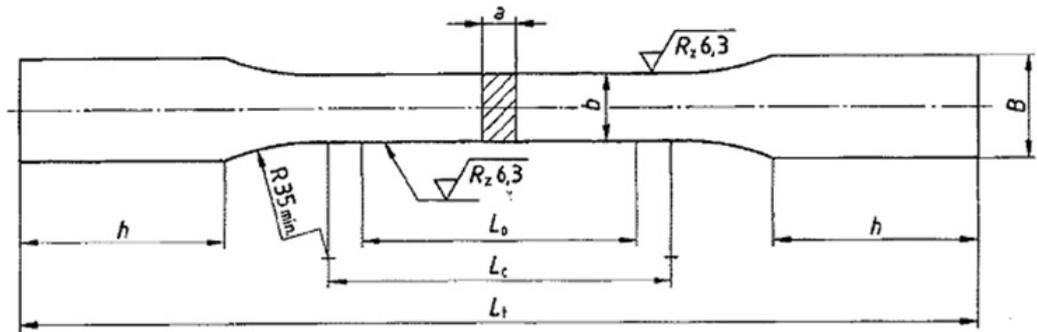


Abbildung 68) Klemmbacke 80mm Teil 2

## 9.3. Anhang C – Prüfkörper

### 3.5 Zugproben Form E

Flachproben mit Köpfen für Spannkeile



**a** Probendicke  
**b** Probenbreite  
**B** Kopfbreite ( $\approx 1,2b + 3 \text{ mm}$ )  
**h** Kopfhöhe ( $\approx 2b + 10 \text{ mm}$ )

$L_0$  Anfangsmeßlänge  
 $L_c$  Versuchslänge ( $L_c \geq L_0 + 1,5\sqrt{S_0}$ )  
 $L_t$  Gesamtlänge

Alle Angaben in mm:

a	b	$L_0$	B	h	$L_c$	$L_t$
3	8	30	12	26	38	115

Grenzabmaße und Formtoleranz<sup>1)</sup> für die Probenbreite b:

Grenzabmaß  $\pm 0,09 \text{ mm}$   
 Formtoleranz  $0,043 \text{ mm}$

<sup>1)</sup> Entspricht der maximalen Abweichung von der Parallelität der Versuchslänge  $L_c$

Abbildung 69) Zeichnung Zugproben-Reinmaterial [44]

## 9.4. Anhang D - Ergebnisse

### 9.4.1. Anhang D1 - Ergebnisse Zugversuch

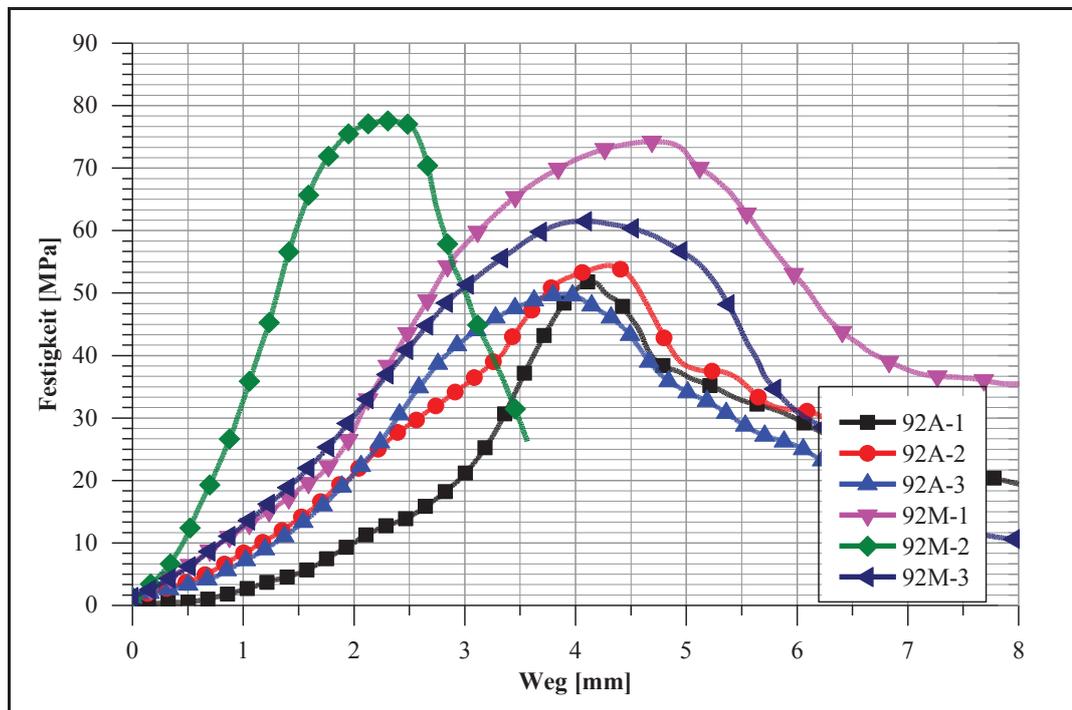


Abbildung 70) Zugversuchskurve VGM92



Abbildung 71) Fotodokumentation Zugversuch VGM92

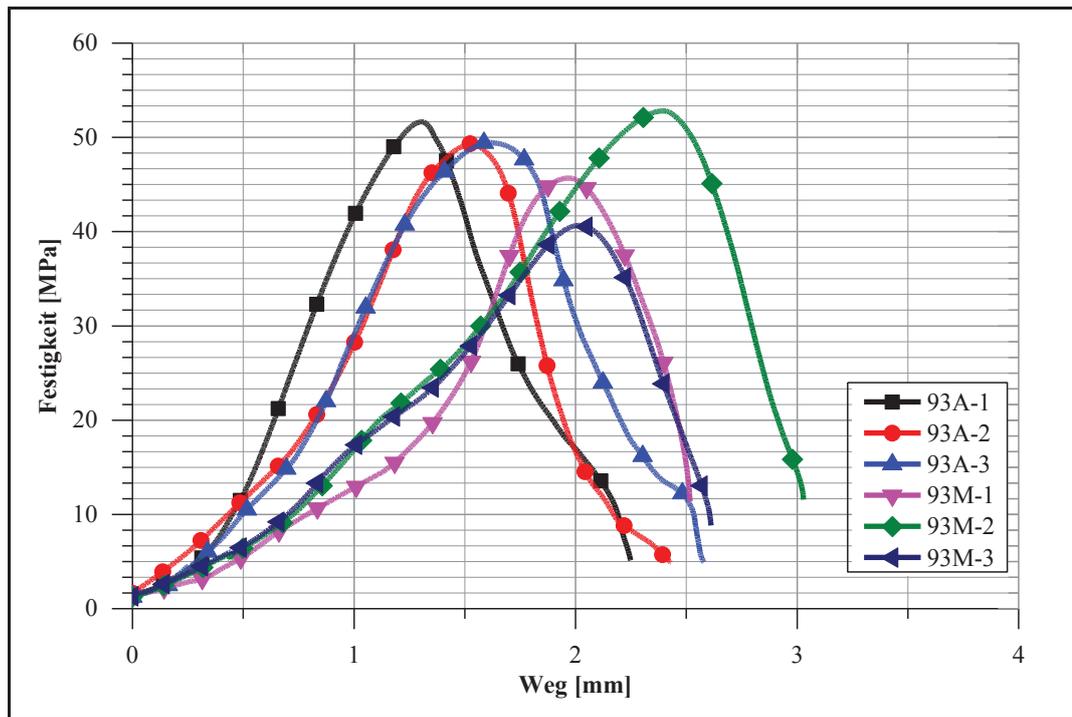


Abbildung 72) Zugversuchskurve VGM93

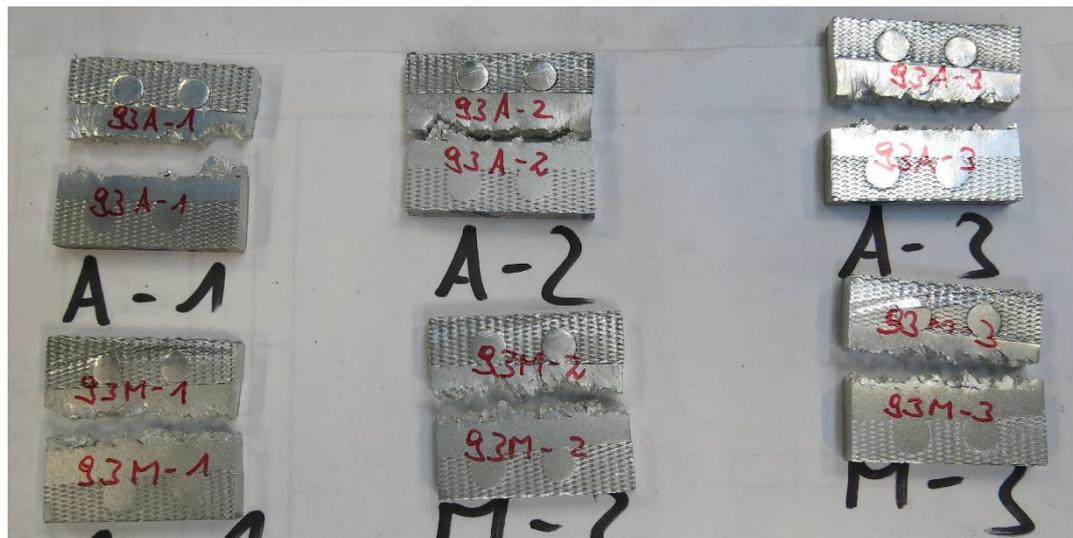


Abbildung 73) Fotodokumentation Zugversuch VGM93

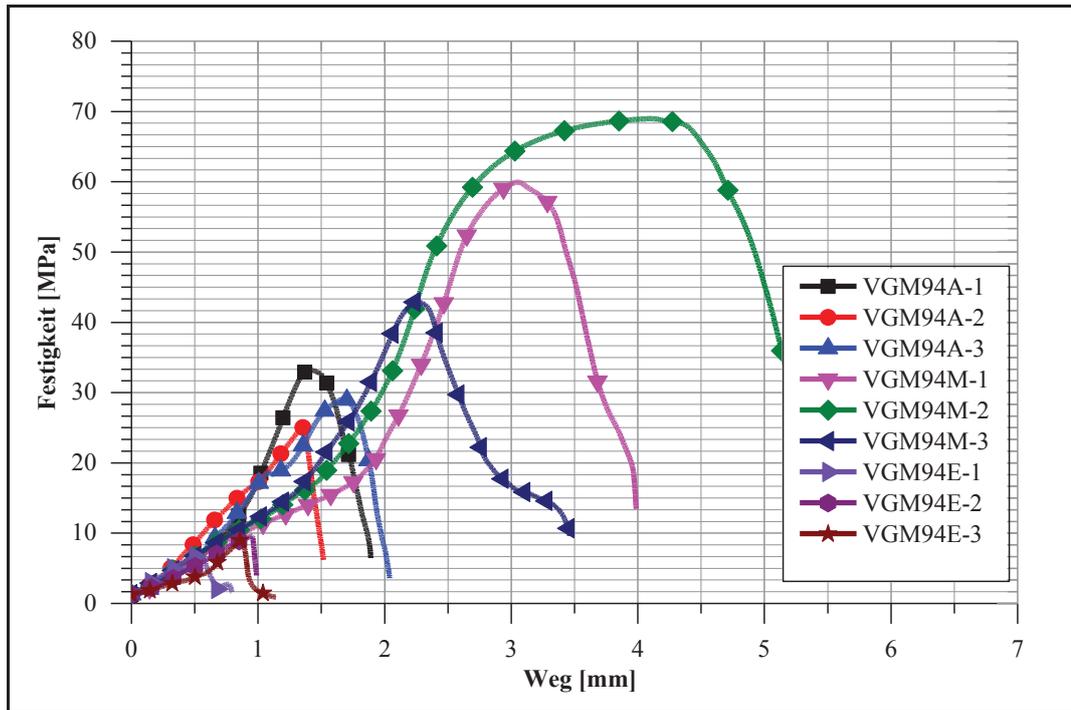


Abbildung 74) Zugversuchskurve VGM94



Abbildung 75) Fotodokumentation Zugversuch VGM94

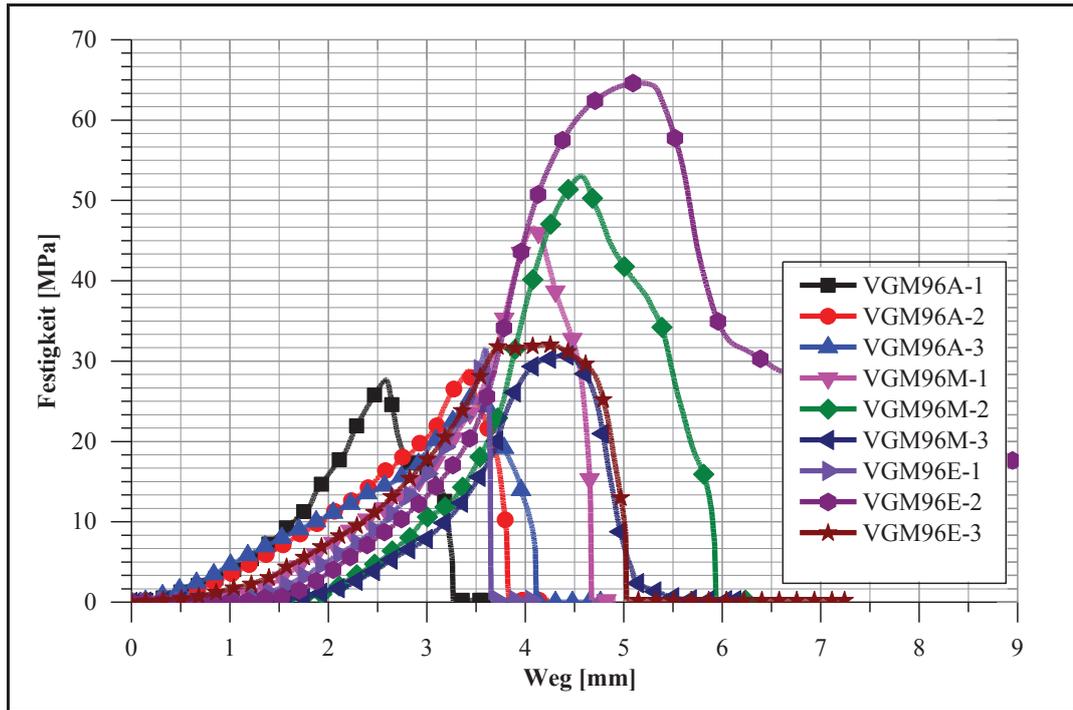


Abbildung 76) Zugversuchskurve VGM96



Abbildung 77) Fotodokumentation Zugversuch VGM96

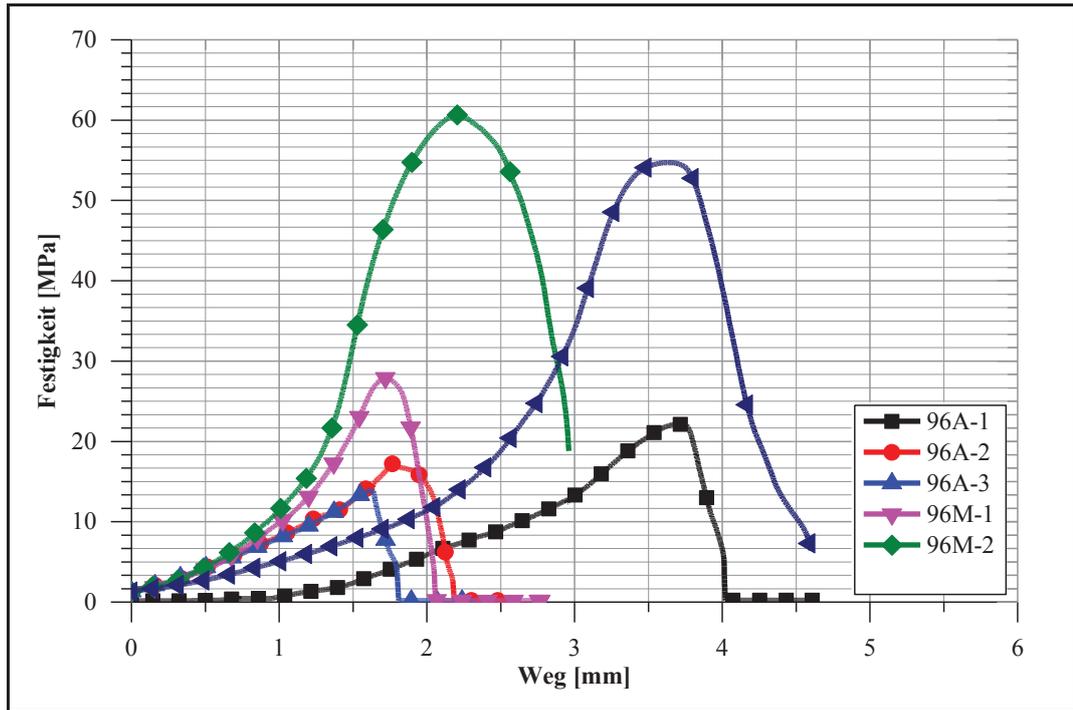


Abbildung 78) Zugversuchskurve VGM96\_HT

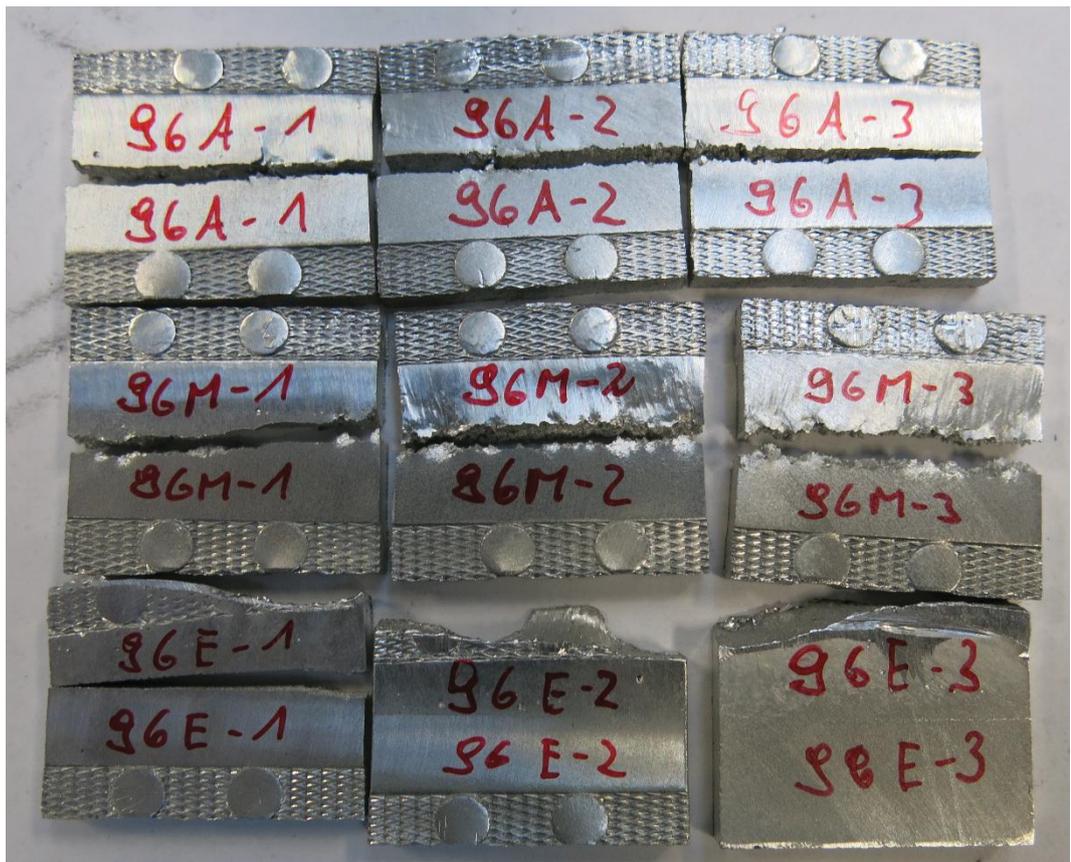


Abbildung 79) Fotodokumentation Zugversuch VGM96\_HT

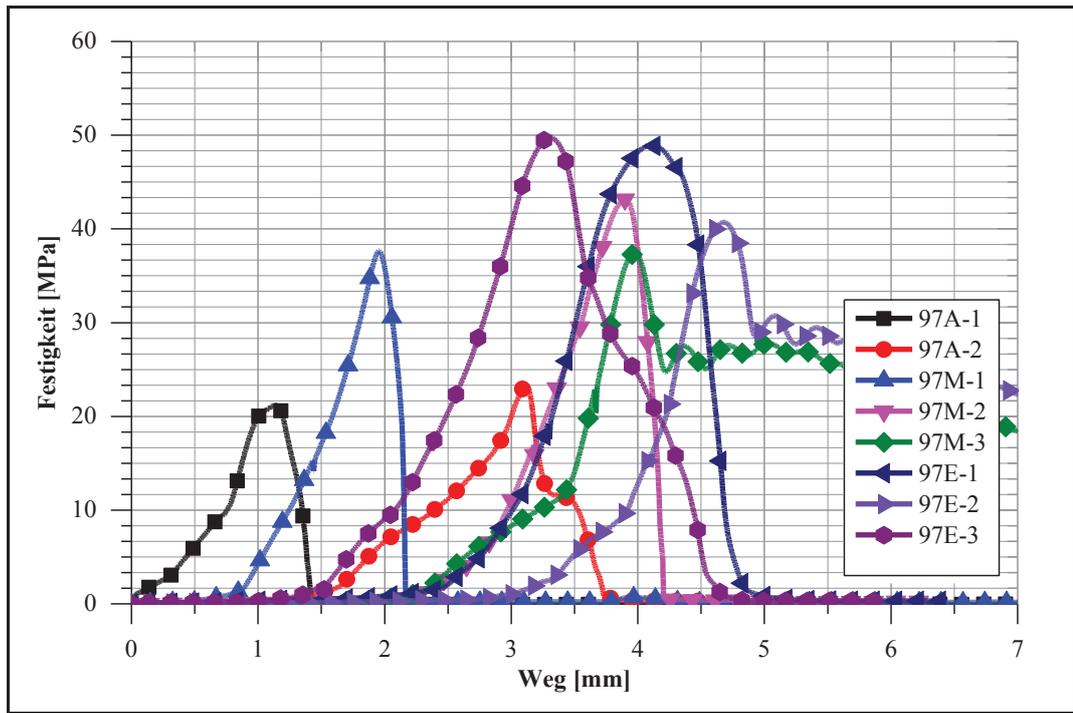


Abbildung 80) Zugversuchskurve VGM97



Abbildung 81) Fotodokumentation Zugversuch VGM97

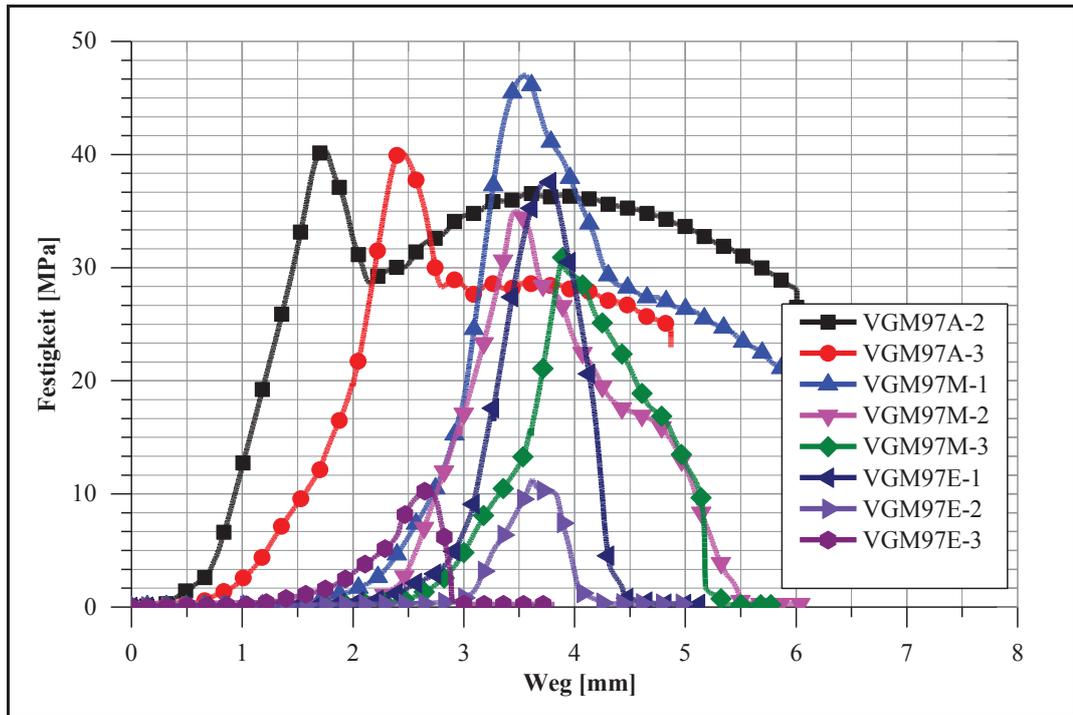


Abbildung 82) Zugversuchskurve VGM97\_HT



Abbildung 83) Fotodokumentation Zugversuch VGM97\_HT

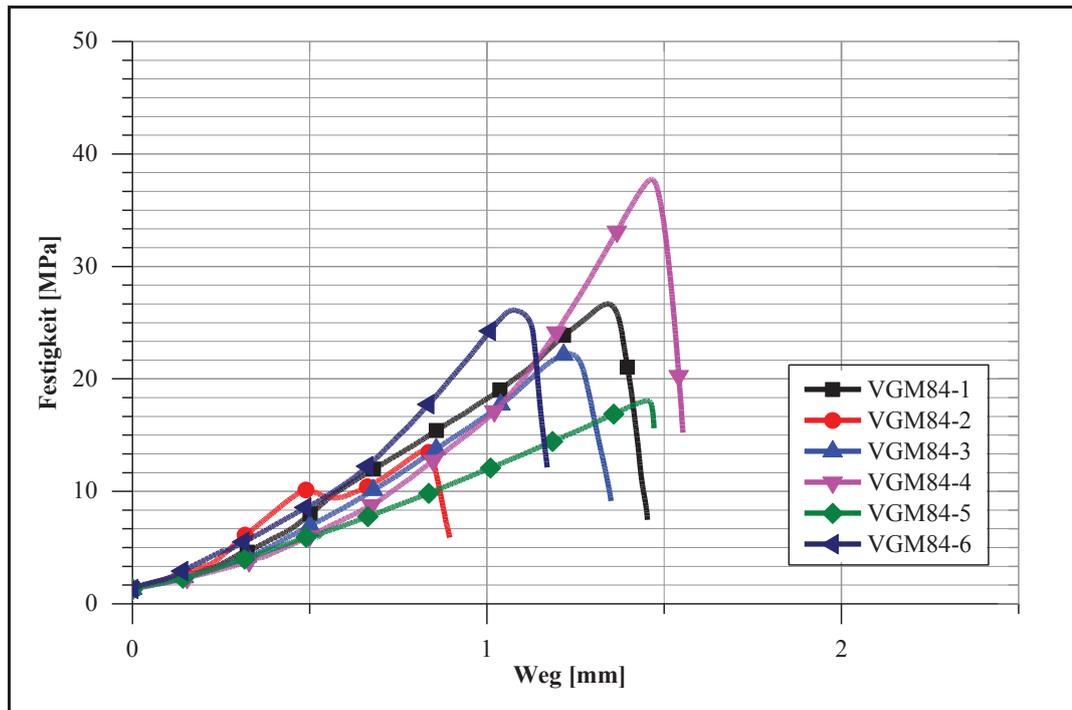


Abbildung 84) Zugversuchskurve VGM84



Abbildung 85) Fotodokumentation Zugversuch VGM84

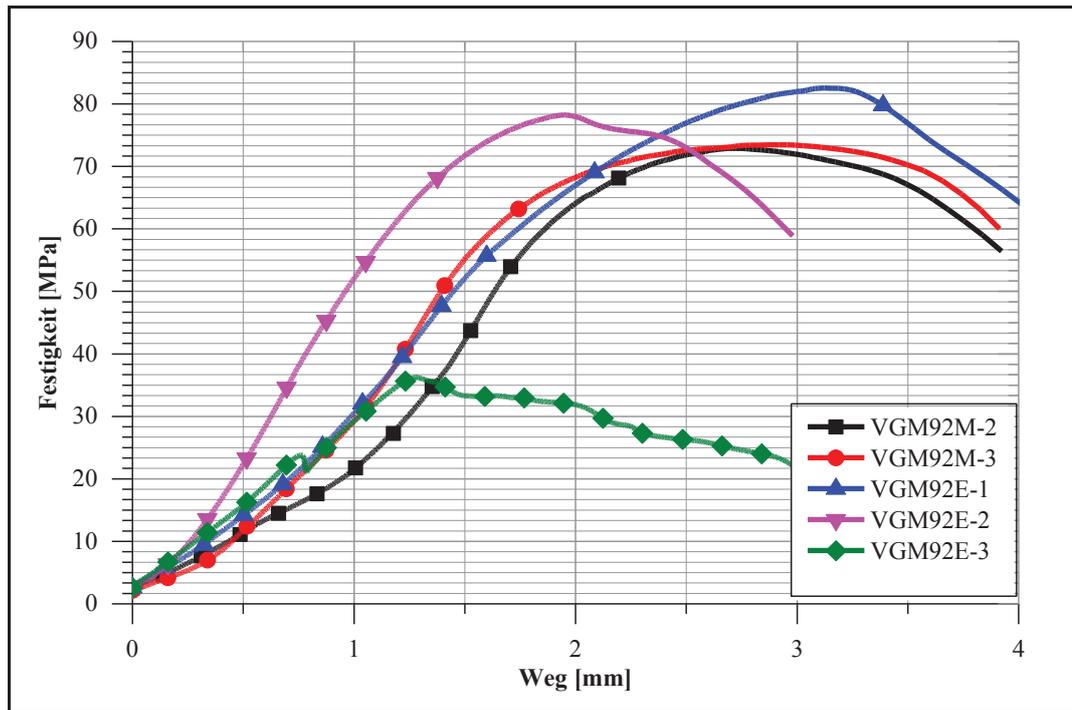


Abbildung 86) Zugversuchskurve VGM92\_HT



Abbildung 87) Fotodokumentation Zugversuch VGM92\_HT

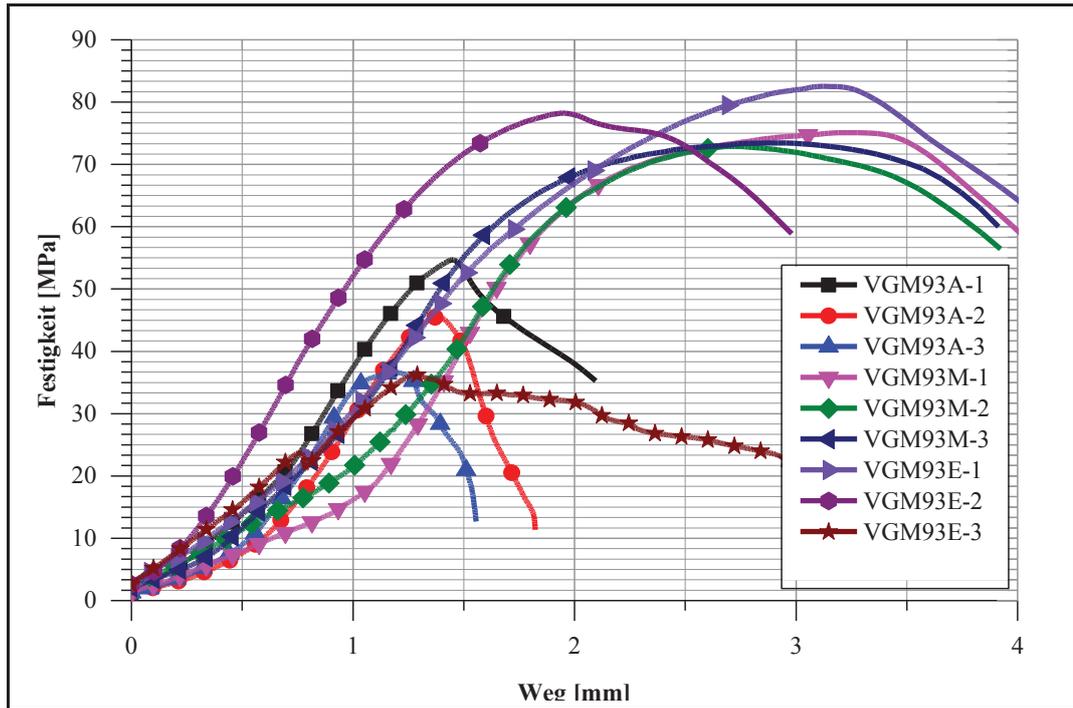


Abbildung 88) Zugversuchskurve VGM93\_HT



Abbildung 89) Fotodokumentation Zugversuch VGM93\_HT

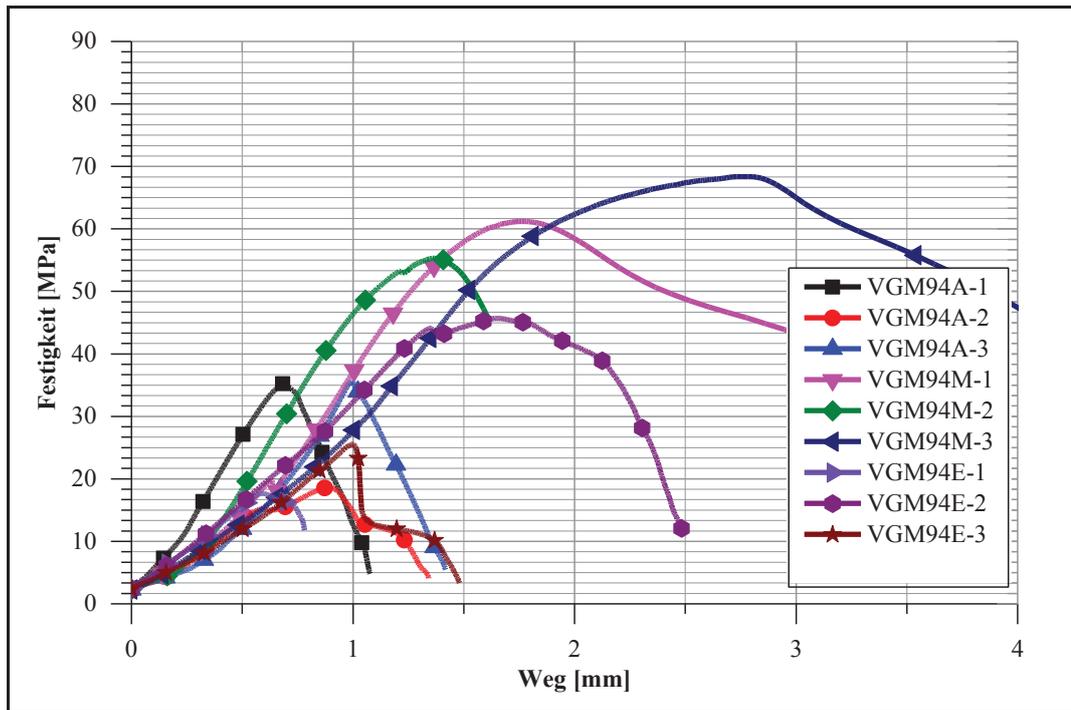


Abbildung 90) Zugversuchskurve VGM94\_HT



Abbildung 91) Fotodokumentation Zugversuch VGM94\_HT

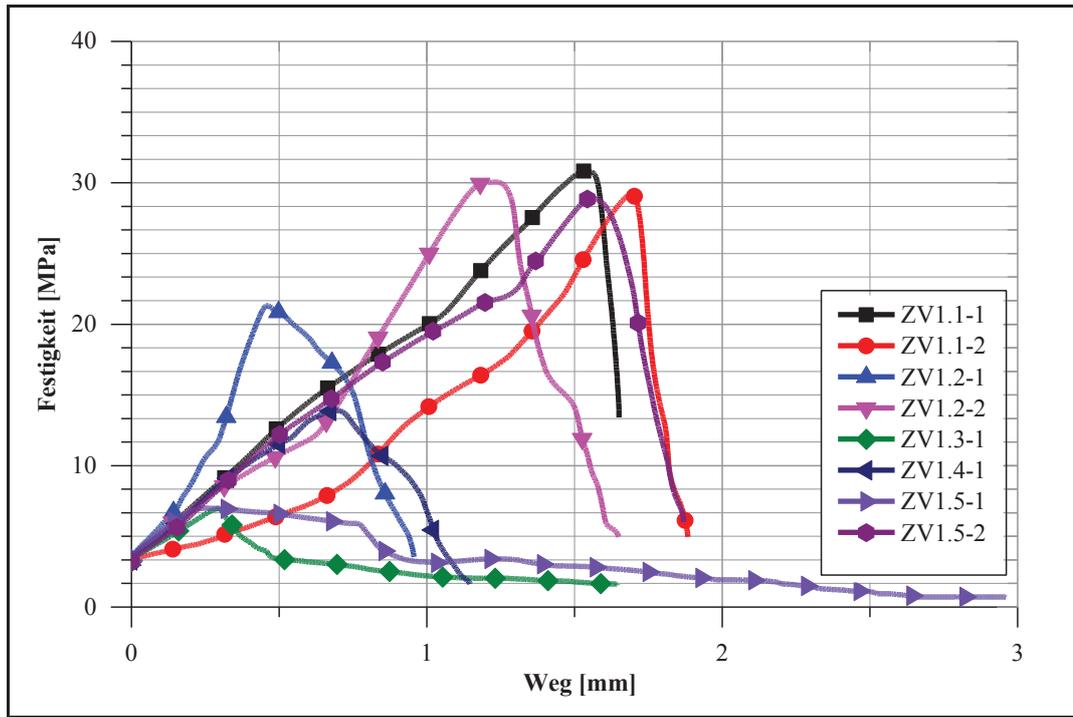


Abbildung 92) Zugversuch Einspannungstest Teil 1

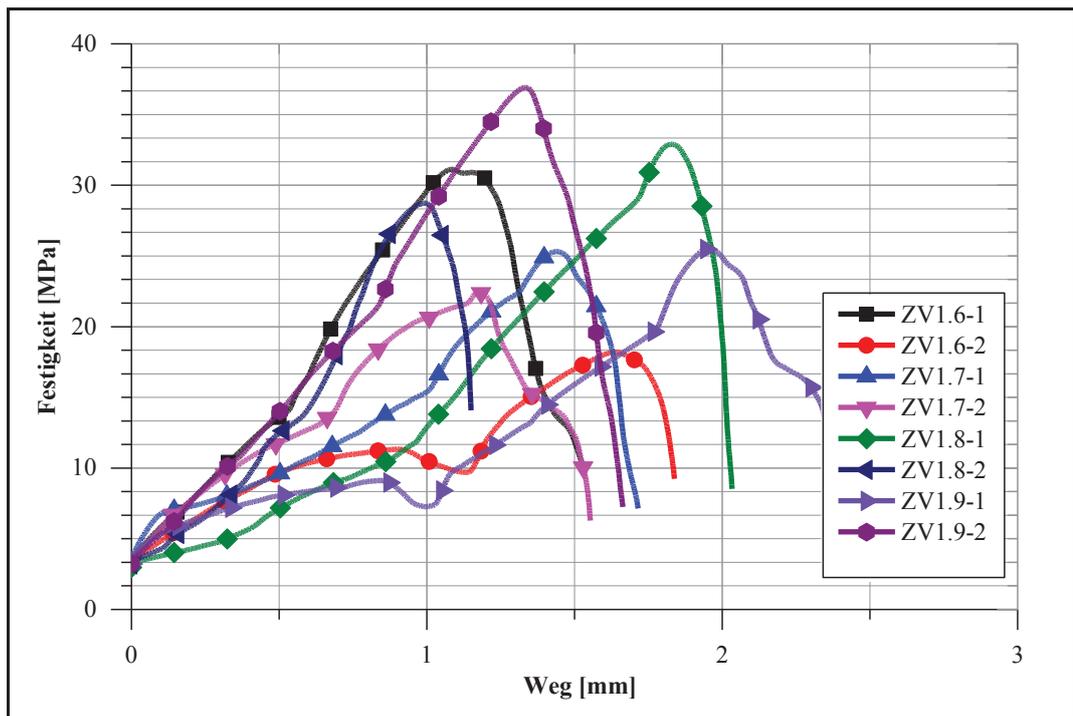


Abbildung 93) Zugversuch Einspannungstest Teil 2

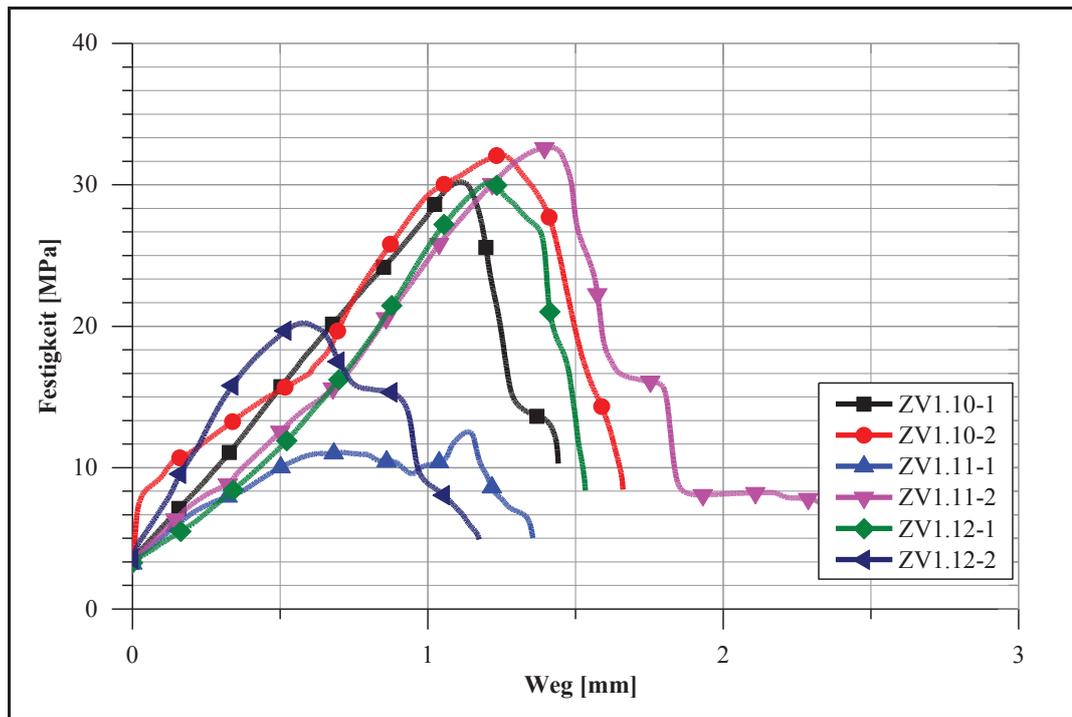


Abbildung 94) Zugversuch Einspannungstest Teil 3

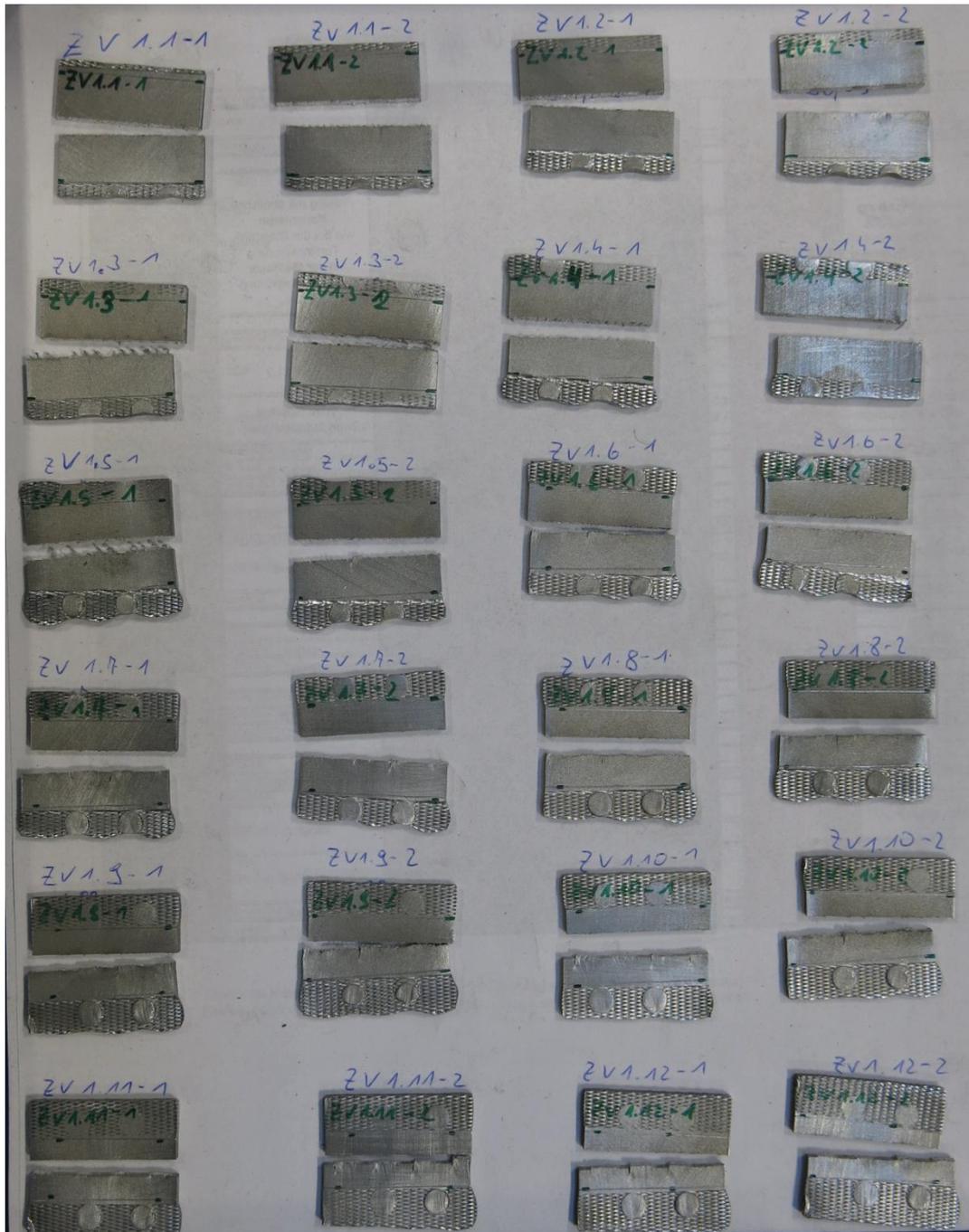


Abbildung 95) Fotodokumentation Zugversuch Einspannungstest

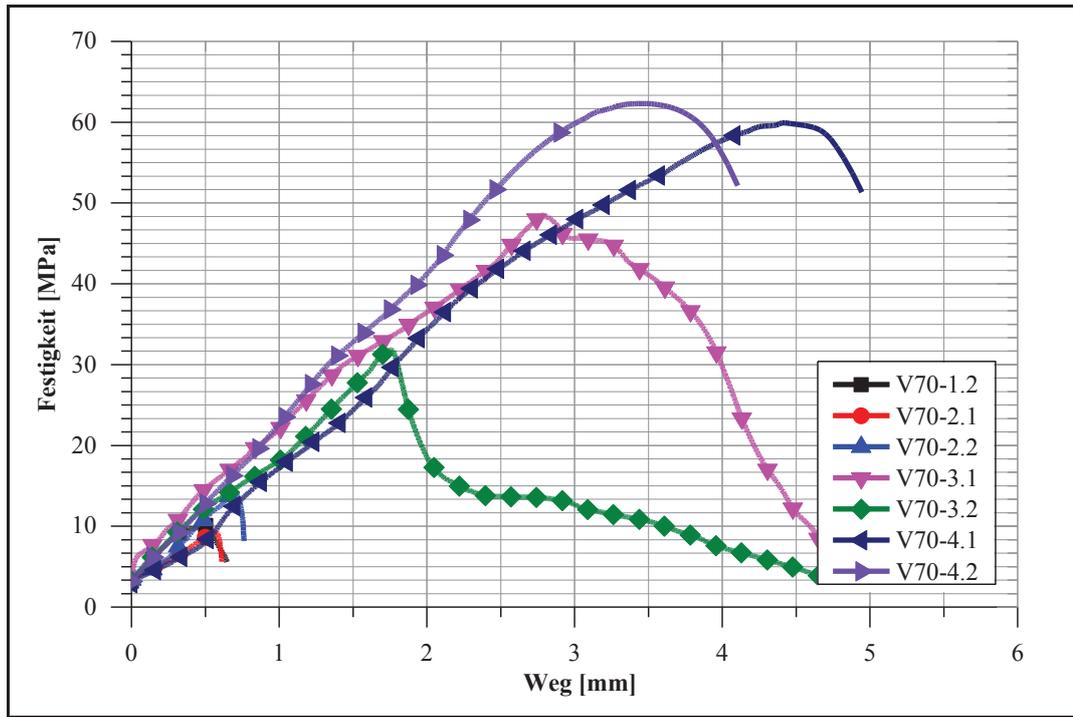


Abbildung 96) Zugversuchskurve V70



Abbildung 97) Fotodokumentation Zugversuch V70

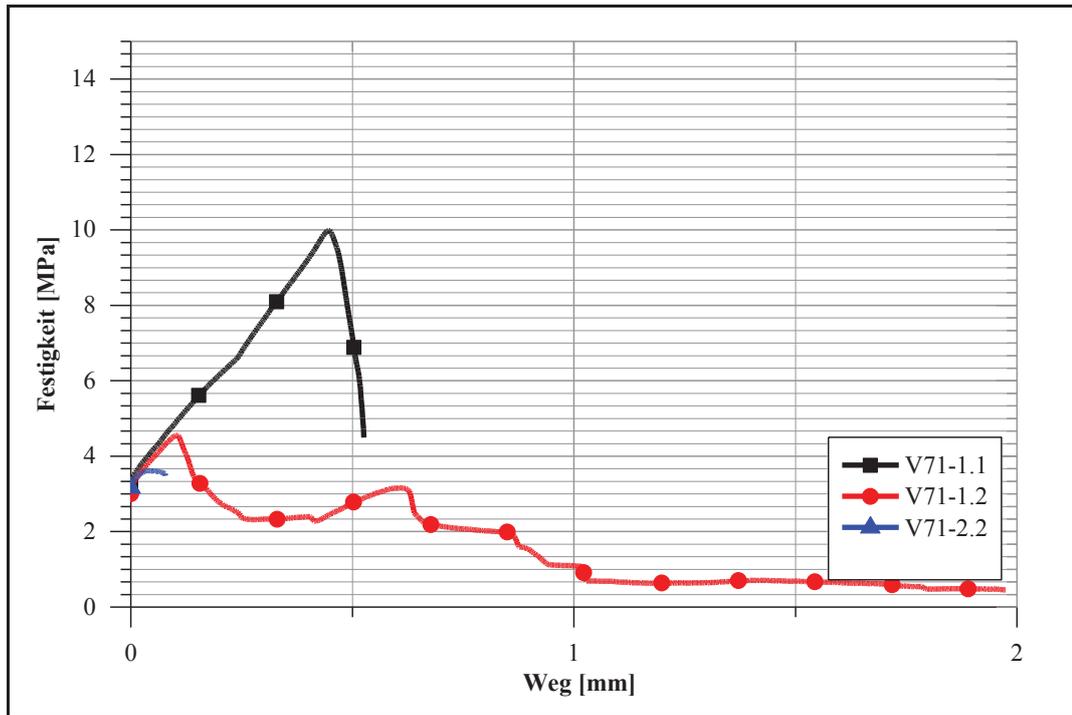


Abbildung 98) Zugversuchskurven V71



Abbildung 99) Fotodokumentation Zugversuch V71

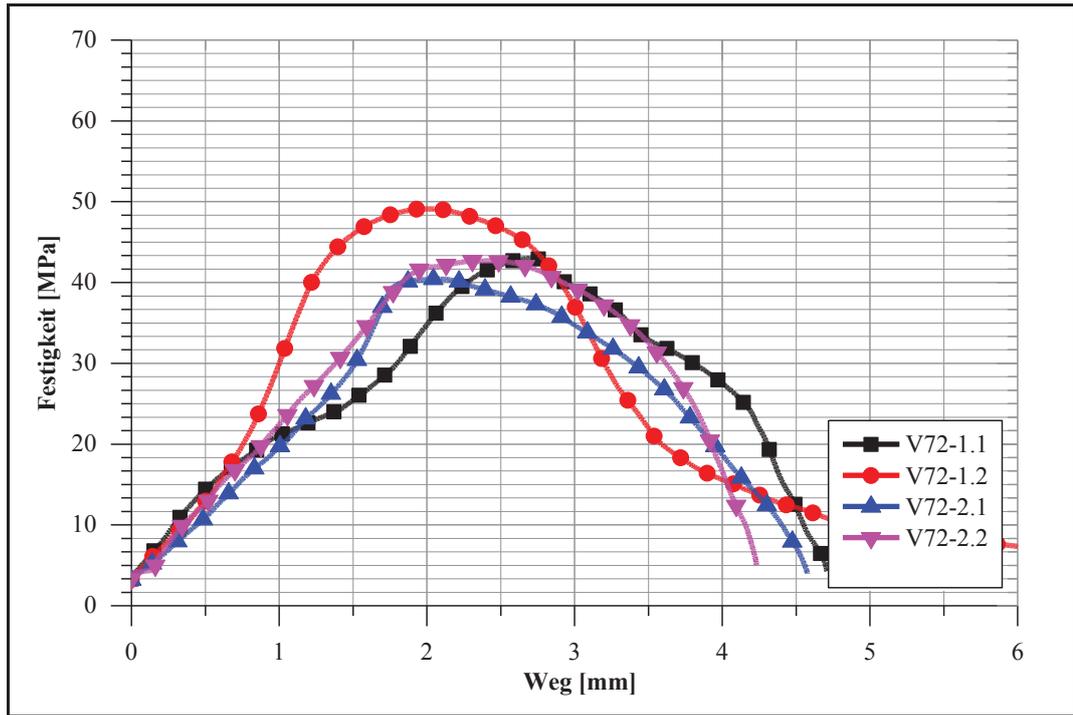


Abbildung 100) Zugversuchskurven V72

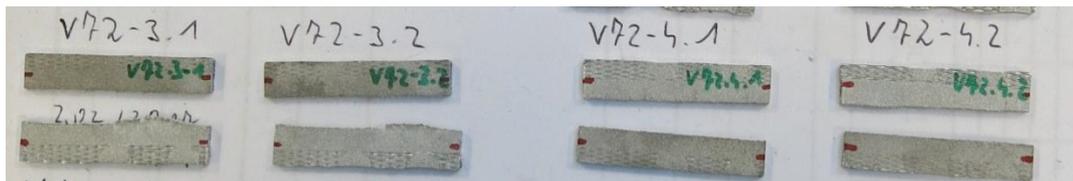


Abbildung 101) Fotodokumentation Zugversuch V72

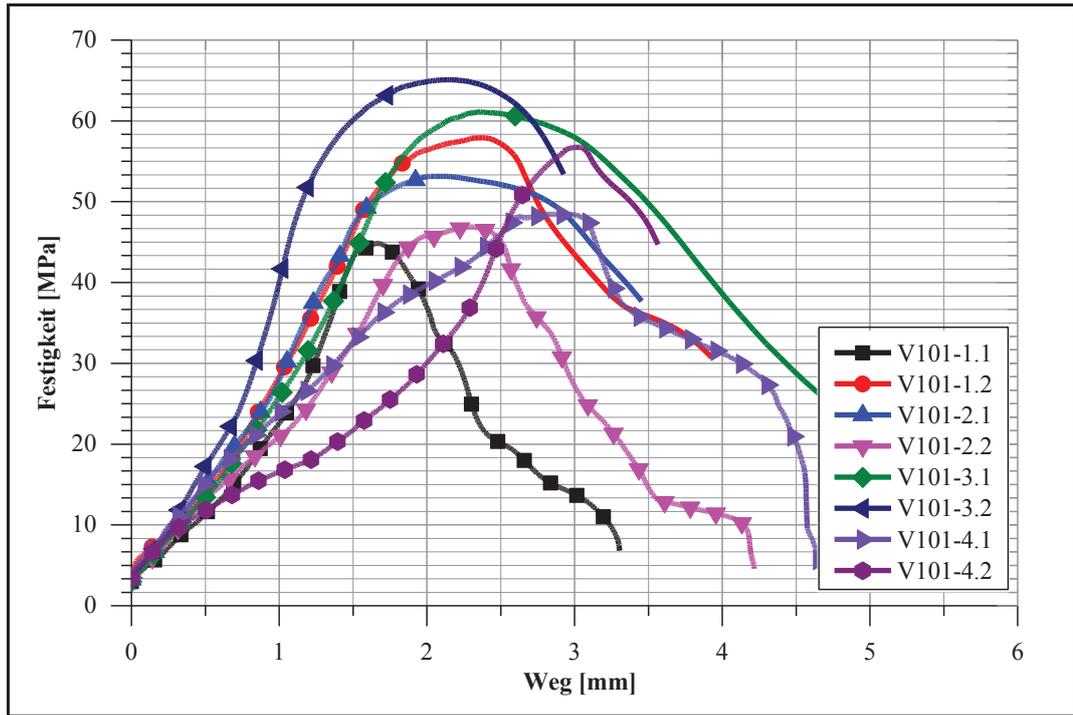


Abbildung 102) Zugversuchskurven V101

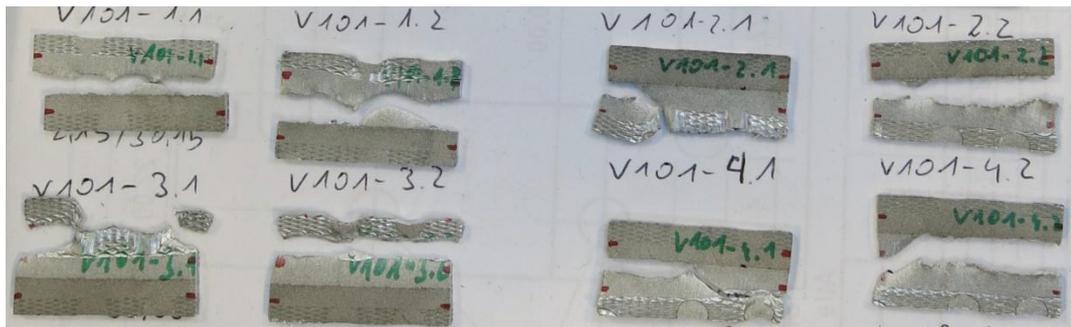


Abbildung 103) Fotodokumentation Zugversuch V101

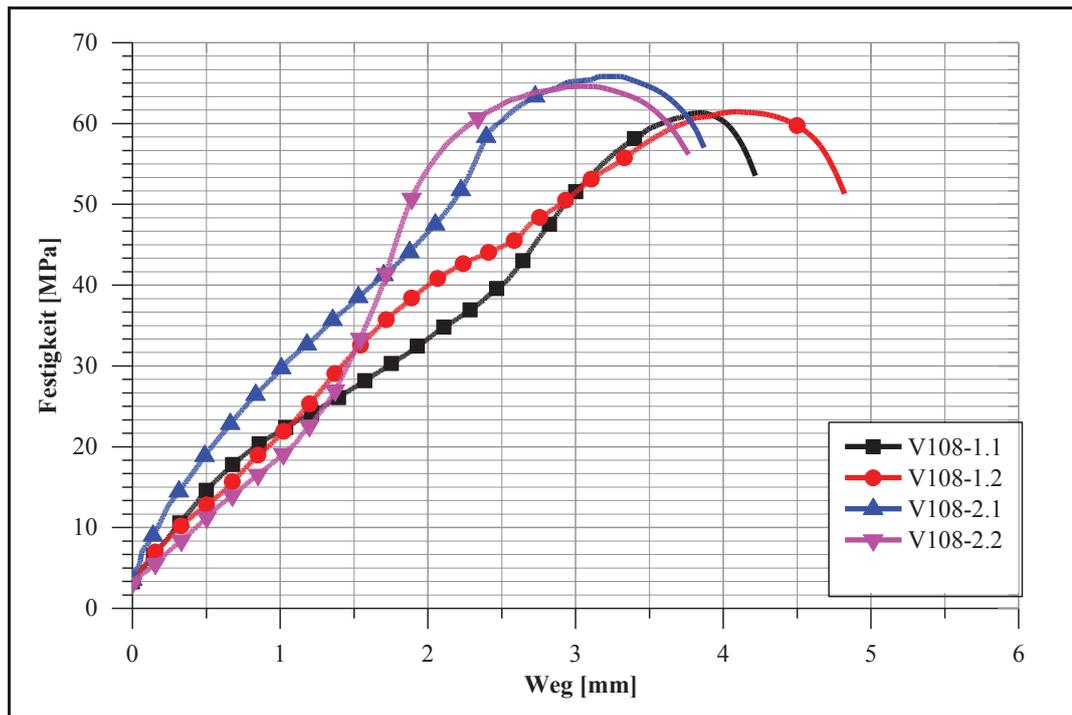


Abbildung 104) Zugversuchskurve V108

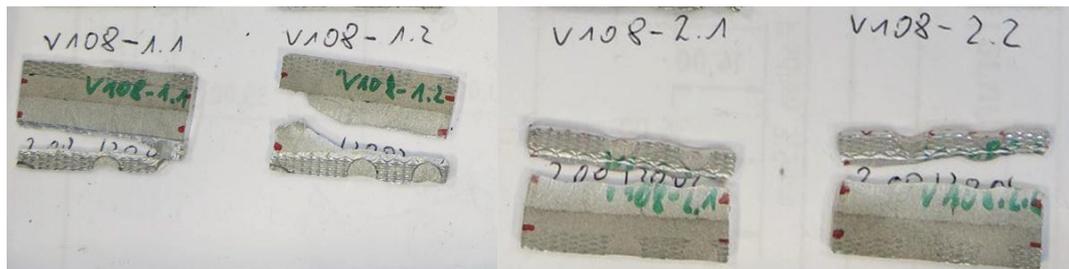


Abbildung 105) Fotodokumentation Zugversuch V108

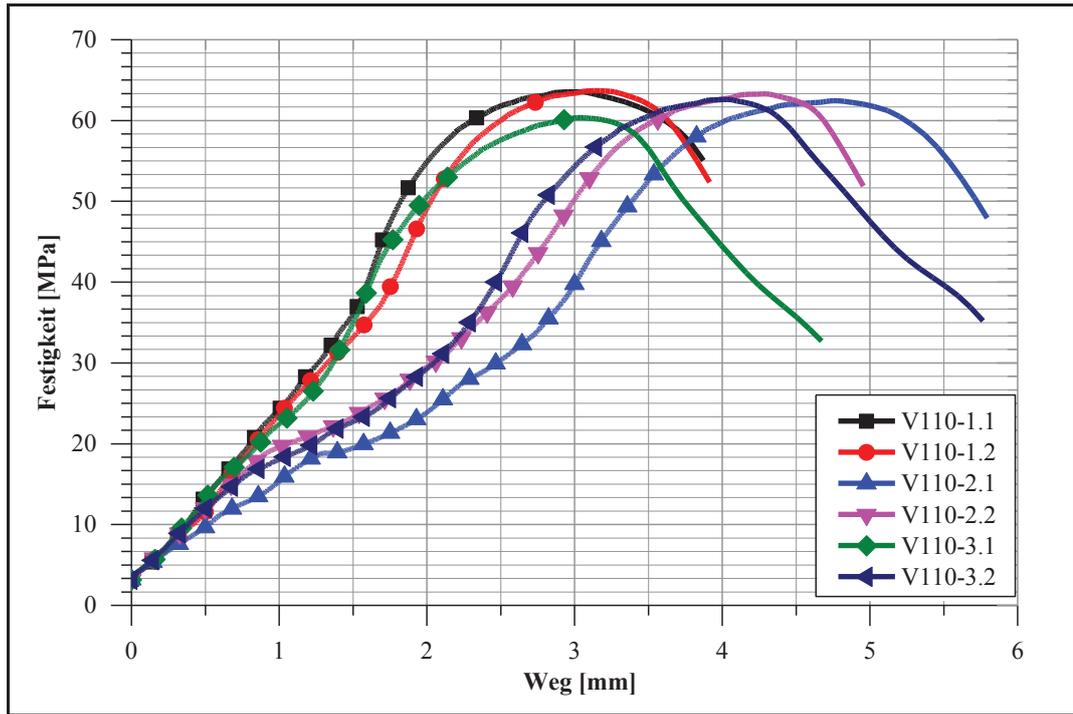


Abbildung 106) Zugversuchskurve V110 Teil 1

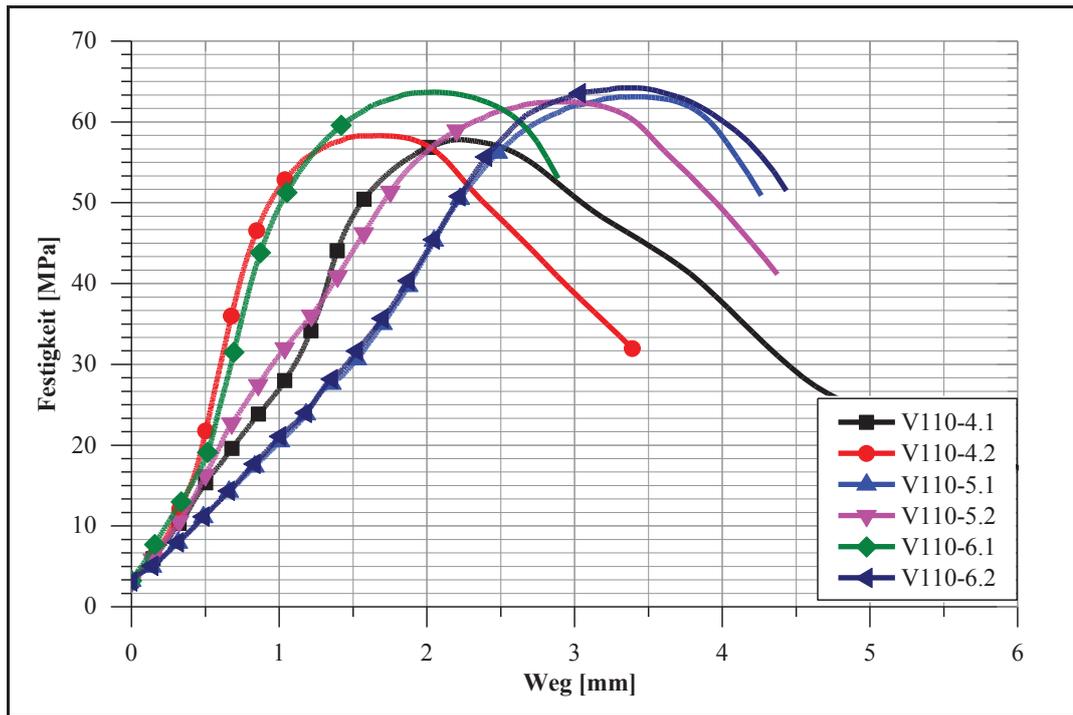


Abbildung 107) Zugversuchskurve V110 Teil 2

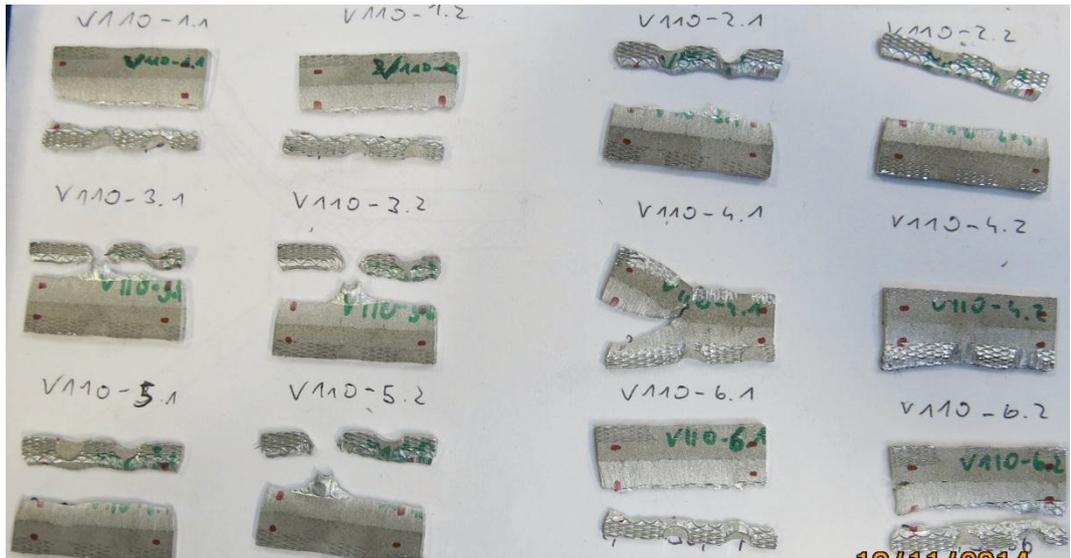


Abbildung 108) Fotodokumentation Zugversuch V110

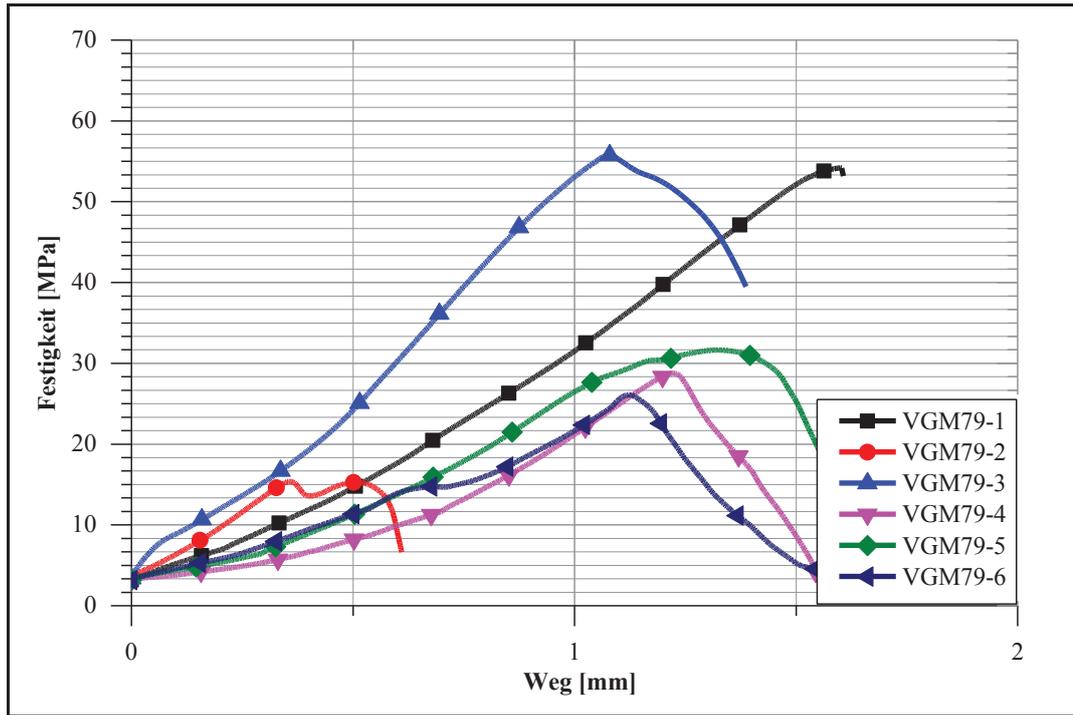


Abbildung 109) Zugversuchskurve VGM79

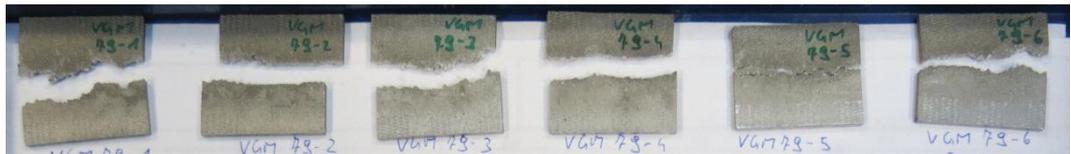


Abbildung 110) Fotodokumentation Zugversuch VGM79

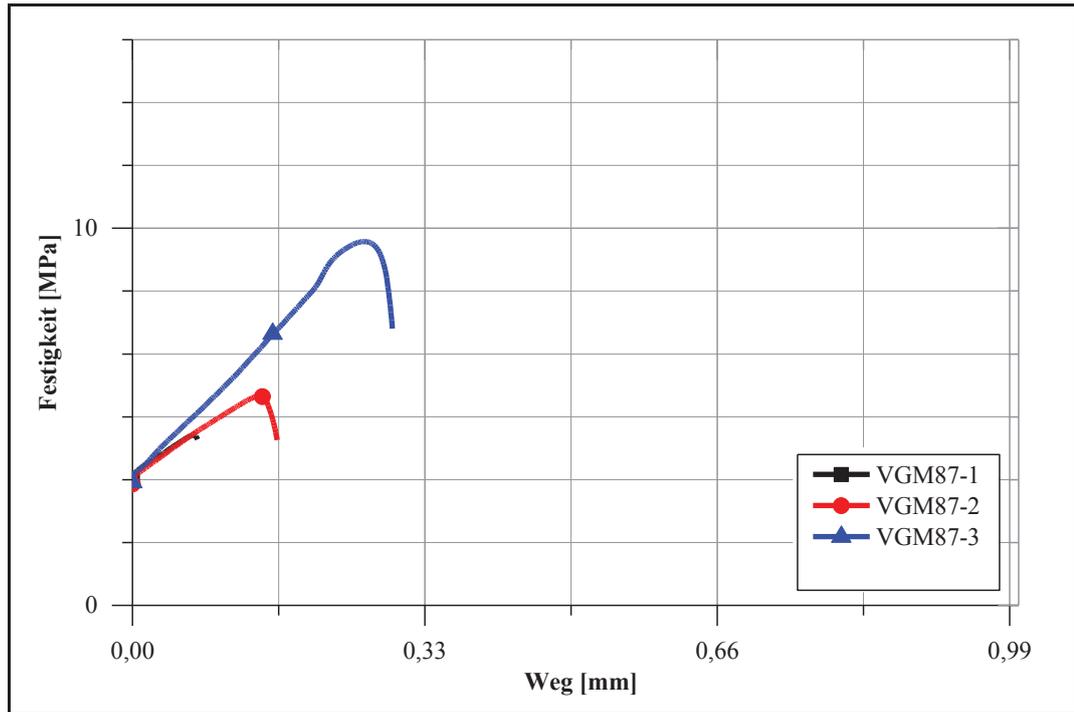


Abbildung 111) Zugversuchskurven VGM87



Abbildung 112) Fotodokumentation Zugversuch VGM87

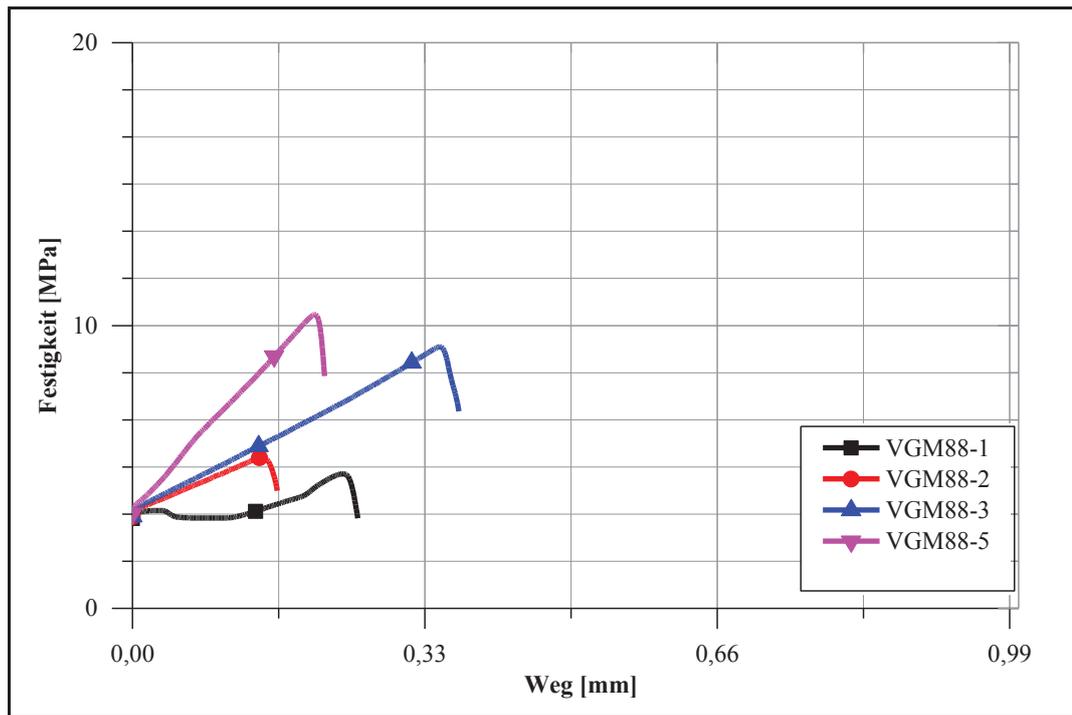


Abbildung 113) Zugversuchskurve VGM88

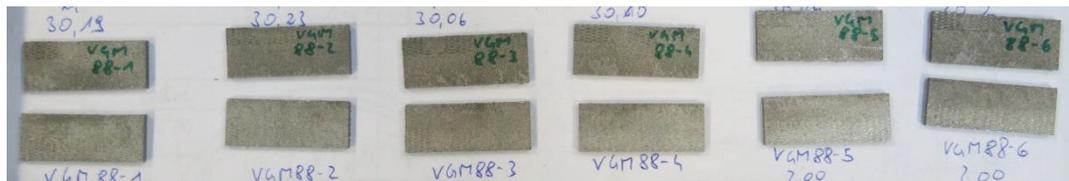


Abbildung 114) Fotodokumentation Zugversuch VGM88

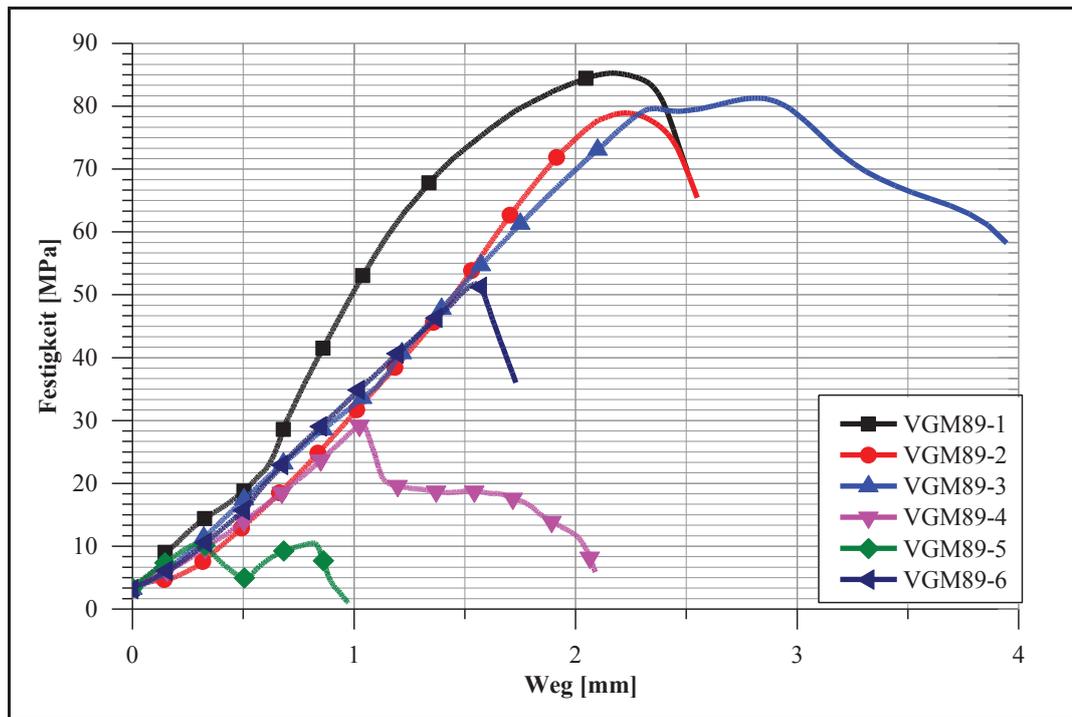


Abbildung 115) Zugversuchskurve VGM89



Abbildung 116) Fotodokumentation Zugversuch VGM89

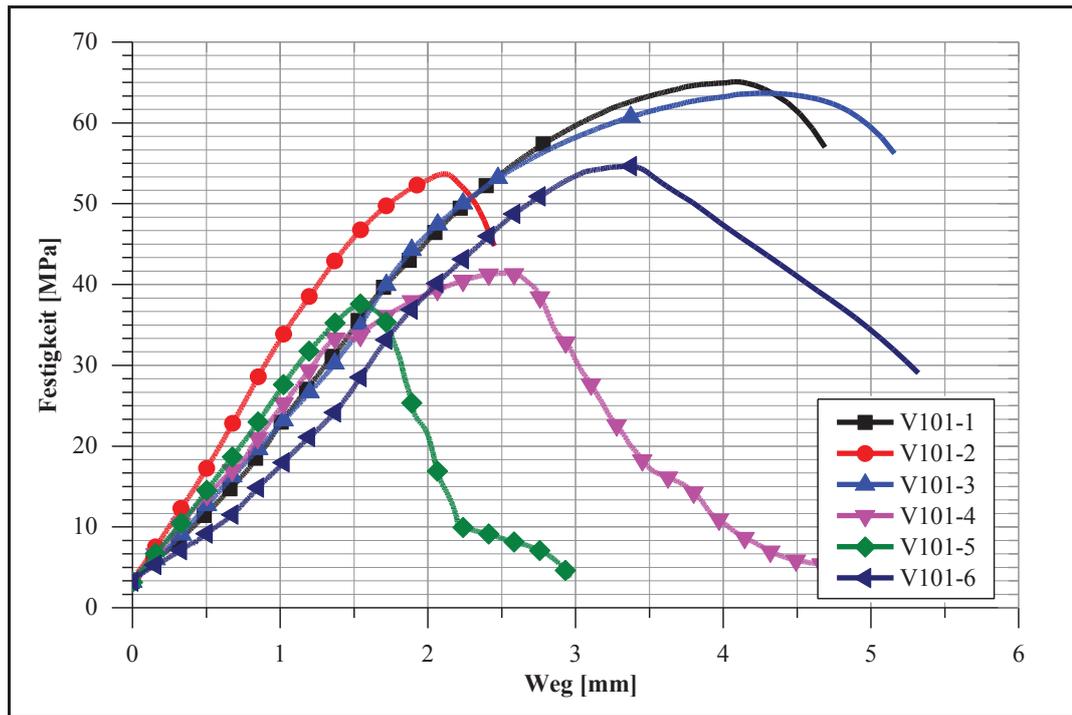


Abbildung 117) Zugversuchskurve VGM101



Abbildung 118) Fotodokumentation Zugversuch VGM101

## 9.4.2. Anhang D2 - Ergebnisse Untersuchung der Einzelkomponenten

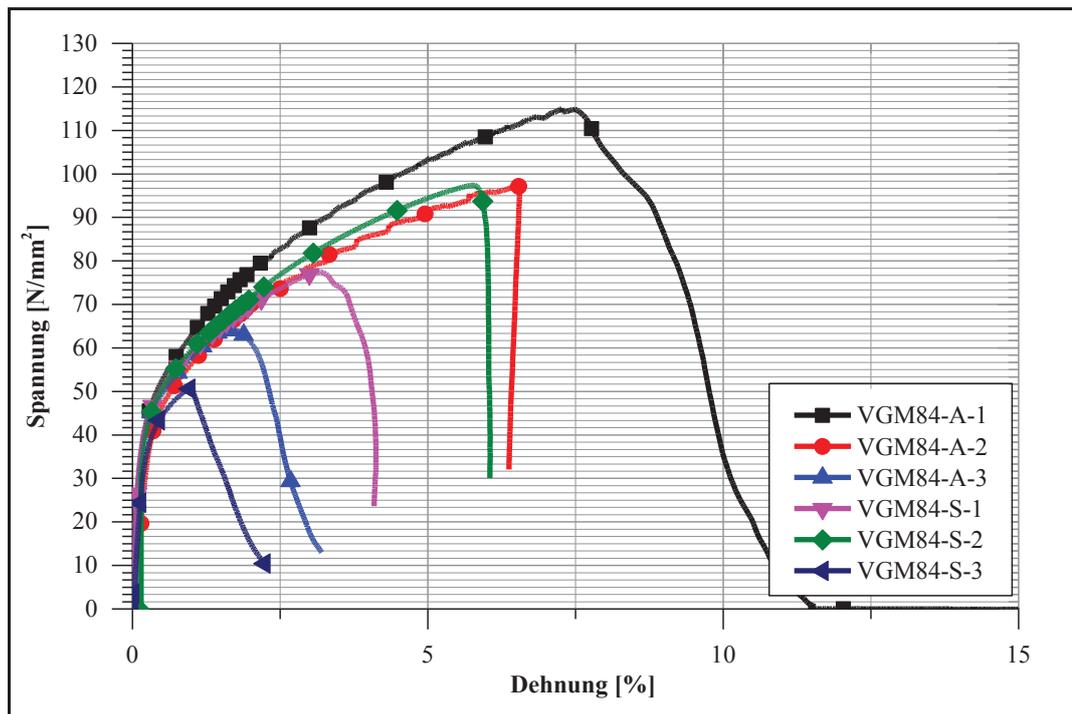


Abbildung 119) Zugversuchskurve Komponenten VGM84



Abbildung 120) Fotodokumentation Zugversuch Komponenten VGM84

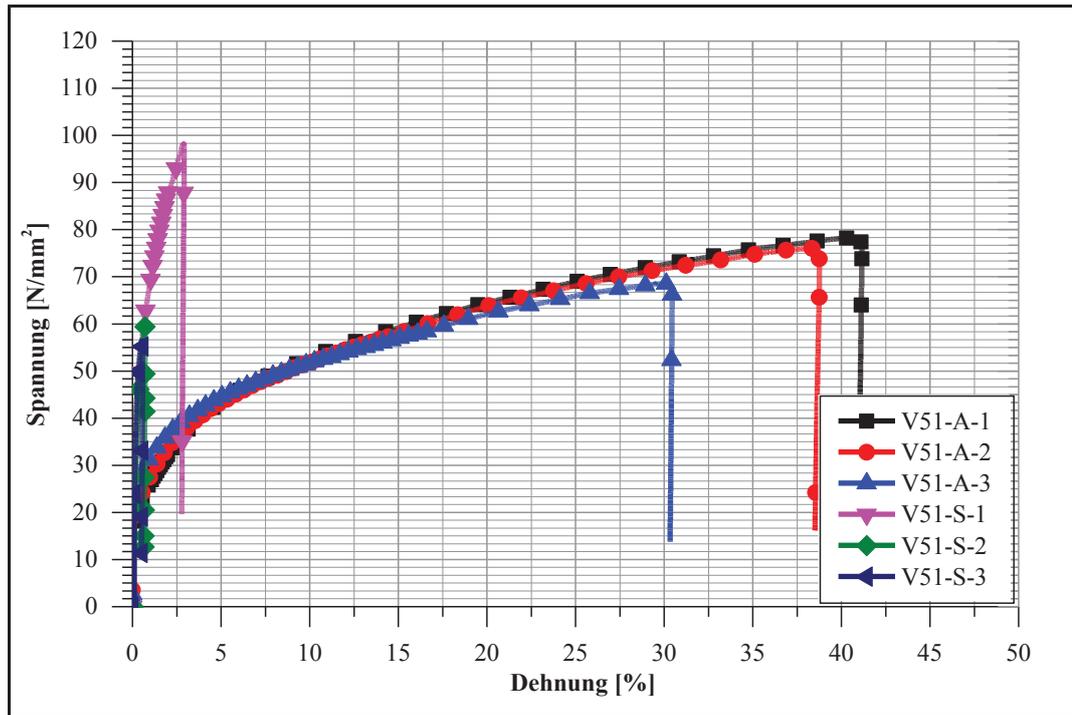


Abbildung 121) Zugversuchskurven Komponenten V51



Abbildung 122) Fotodokumentation Zugversuch Komponenten V51

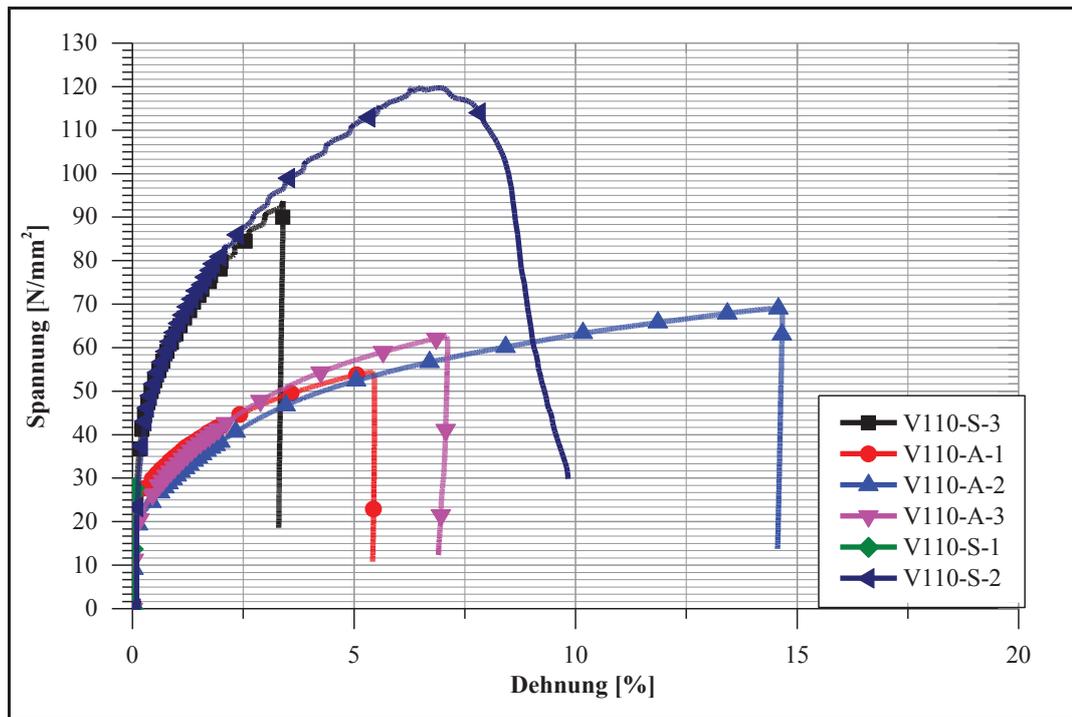


Abbildung 123) Zugversuchskurven Komponenten V110



Abbildung 124) Fotodokumentation Zugversuch Komponenten V110

### 9.4.3. Anhang D3 - Ergebnisse Zentrifugentest



Probe V51-3



Probe V51-4



Probe V51-6



Probe V51-7



Probe V51-8



Probe V51-10



Probe V51-11



Probe V51-13

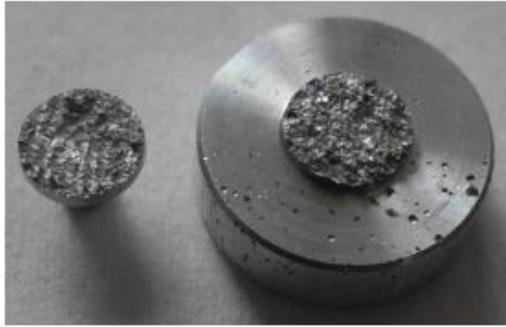


Probe V51-14



Probe V51-15

Abbildung 125) Bruchbilder Zentrifugentest VGM84 [38]



Probe VGM84-1



Probe VGM84-2



Probe VGM84-3



Probe VGM84-4



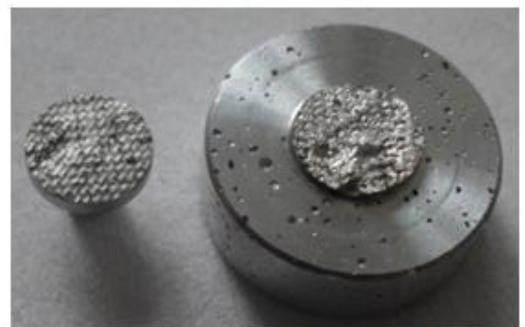
Probe VGM84-5



Probe VGM84-6



Probe VGM84-7



Probe VGM84-8

Abbildung 126) Bruchbilder Zentrifugentest VGM84 [38]



Probe V110-1



Probe V110-2



Probe V110-3



Probe V110-5



Probe V110-6



Probe V110-7



Probe V110-8



Probe V110-9

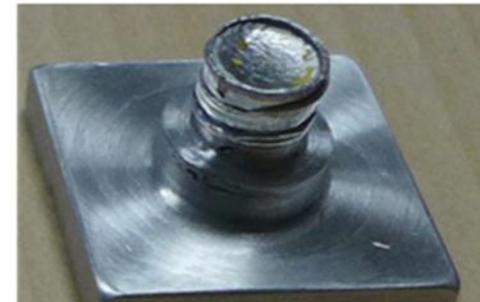
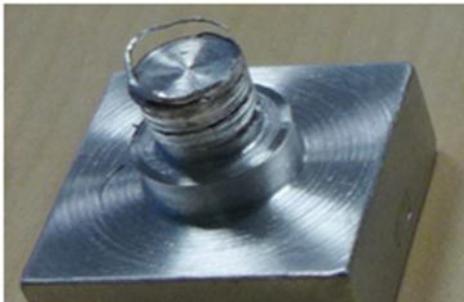


Abbildung 127) Zentrifugentest V110 - 1.Bild [39]



Probe V110-12



Probe V110-13



Probe V110-14



Probe V110-15

Abbildung 128) Zentrifugentest V110 - 2.Bild [39]

#### 9.4.4. Anhang D4 – Ergebnisse Wedge-Test

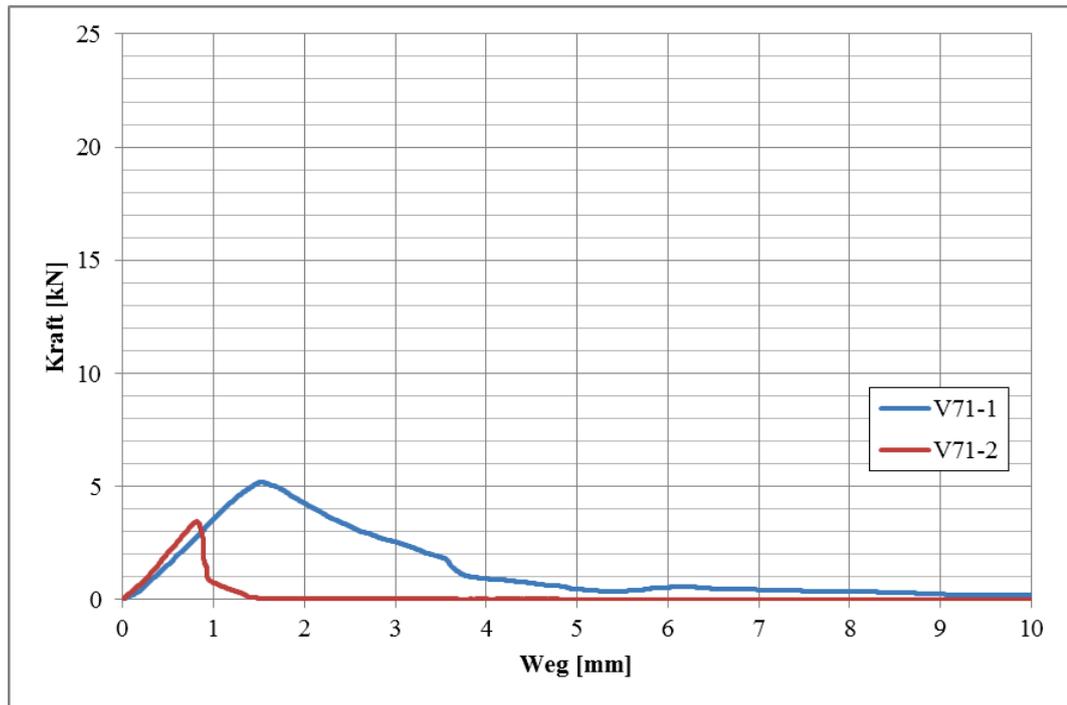


Abbildung 129) Kraftverlauf Wedge-Test V71-1/2

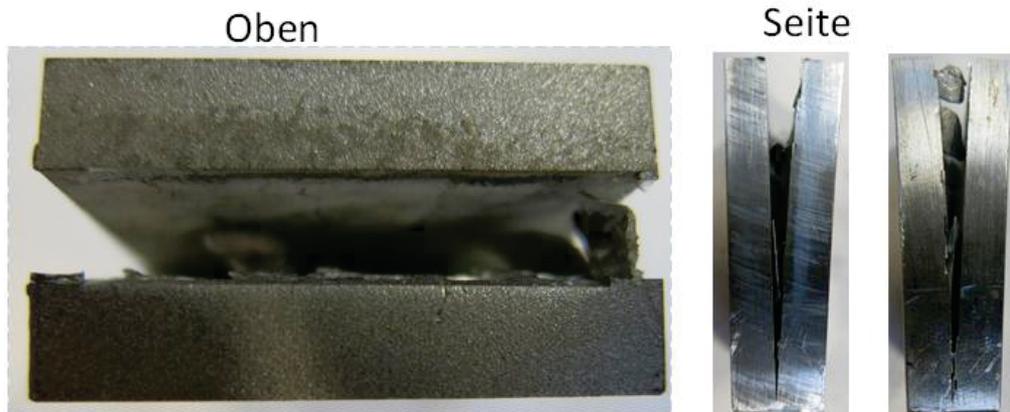


Abbildung 130) Fotodokumentation Wedge-Test V71-1



Abbildung 131) Fotodokumentation Wedge-Test V71-2

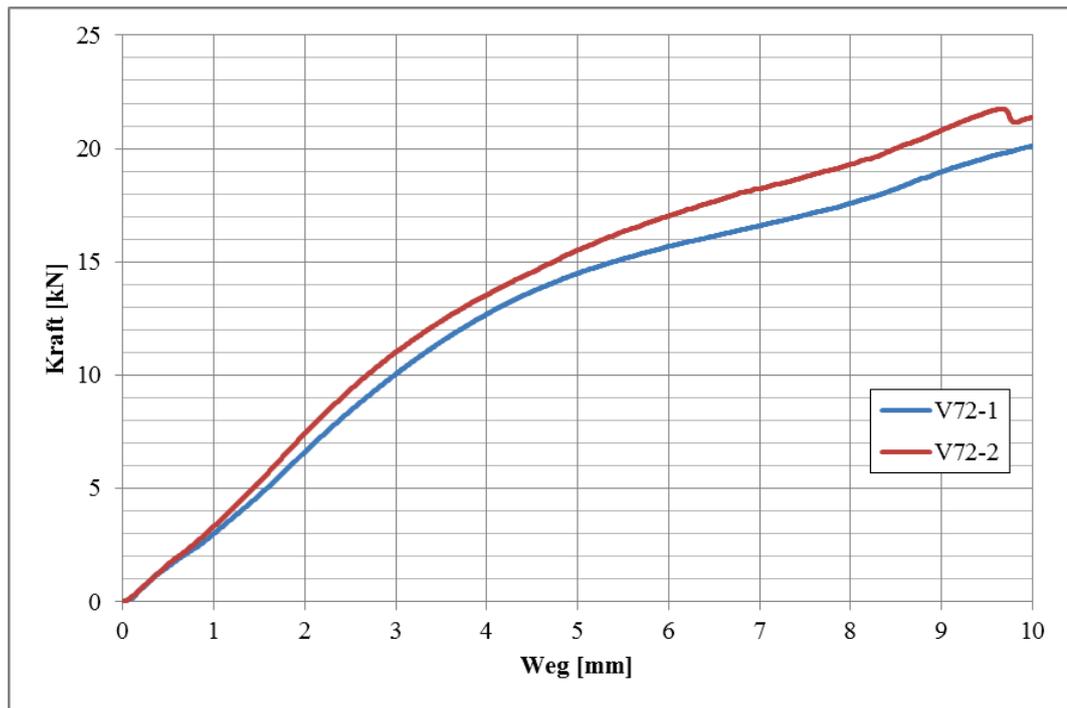


Abbildung 132) Kraftverlauf Wedge-Test V72-1/2



Abbildung 133) Fotodokumentation Wedge-Test V72-1



Abbildung 134) Fotodokumentation Wedge-Test V72-2

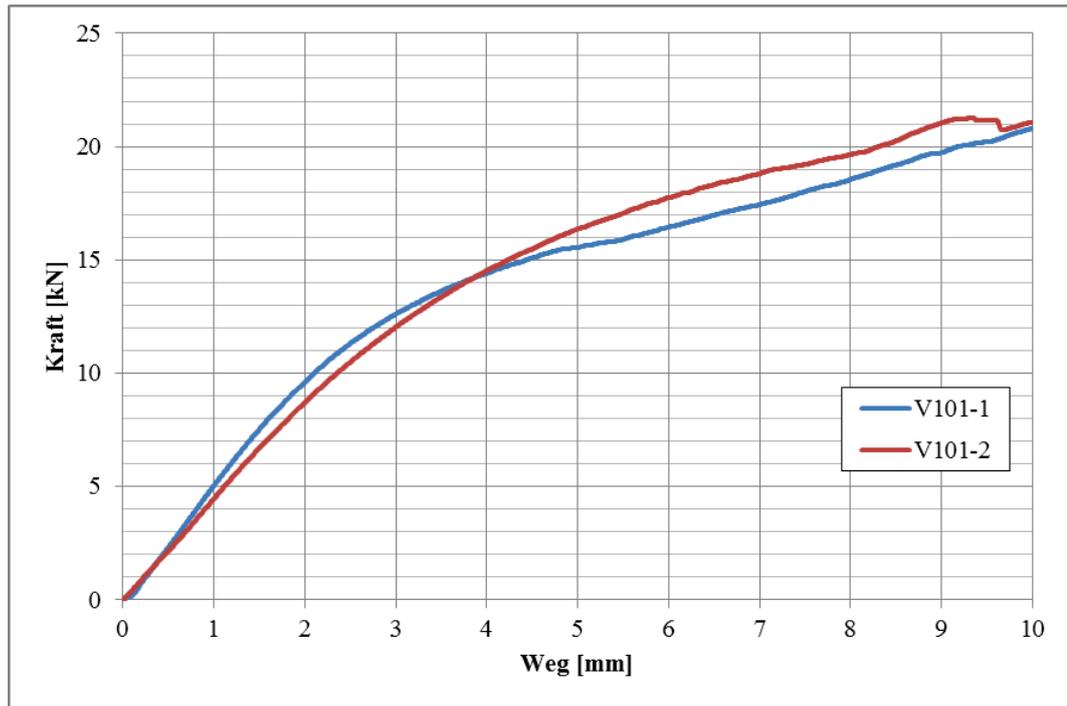


Abbildung 135) Kraftverlauf Wedge-Test V101-1/2



Abbildung 136) Fotodokumentation Wedge-Test V101-1



Abbildung 137) Fotodokumentation Wedge-Test V101-2

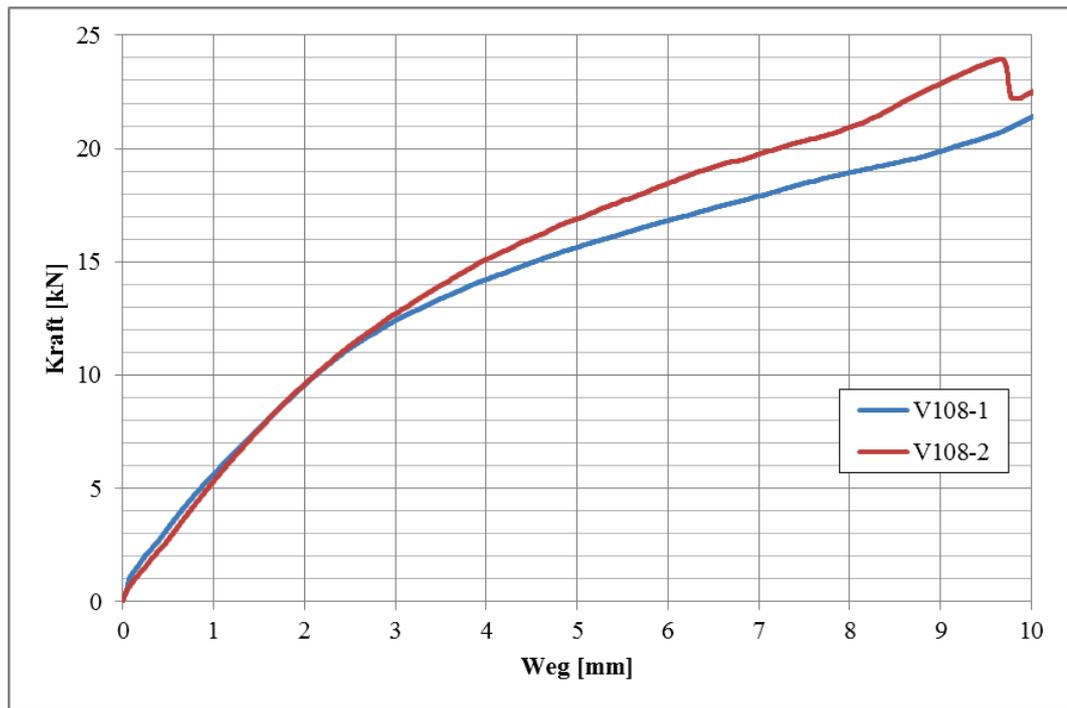


Abbildung 138) Kraftverlauf Wedge-Test V108-1/2

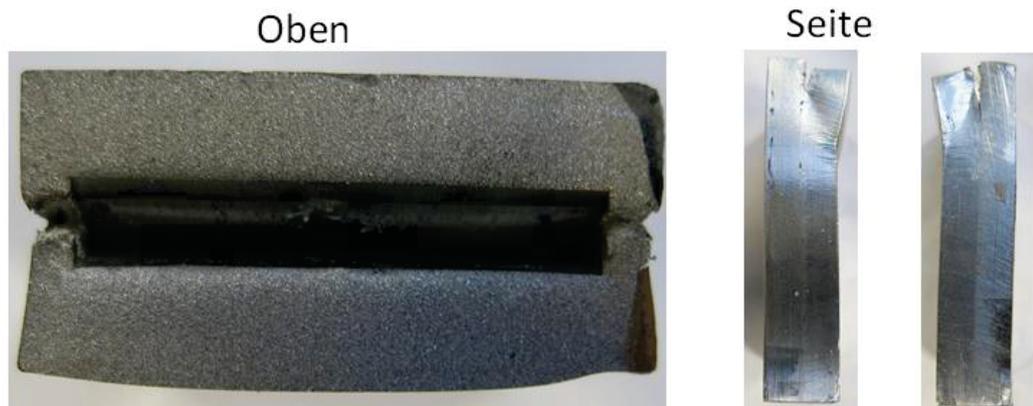


Abbildung 139) Fotodokumentation Wedge-Test V108-1

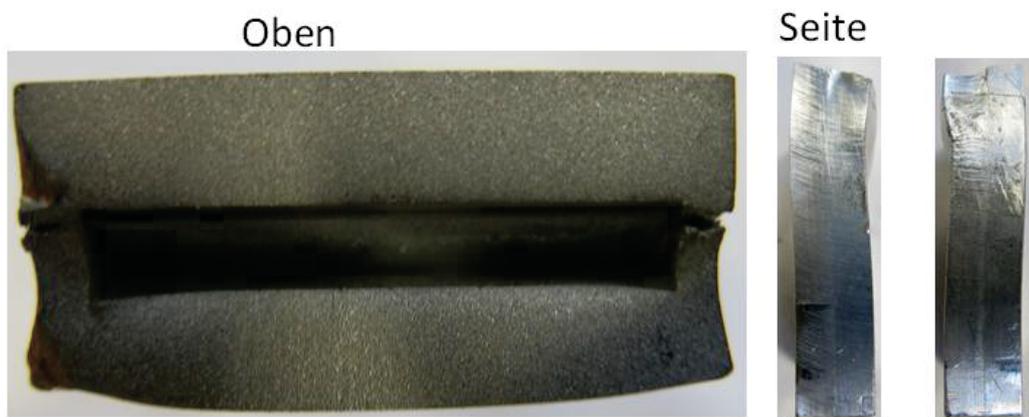


Abbildung 140) Fotodokumentation Wedge-Test V108-2

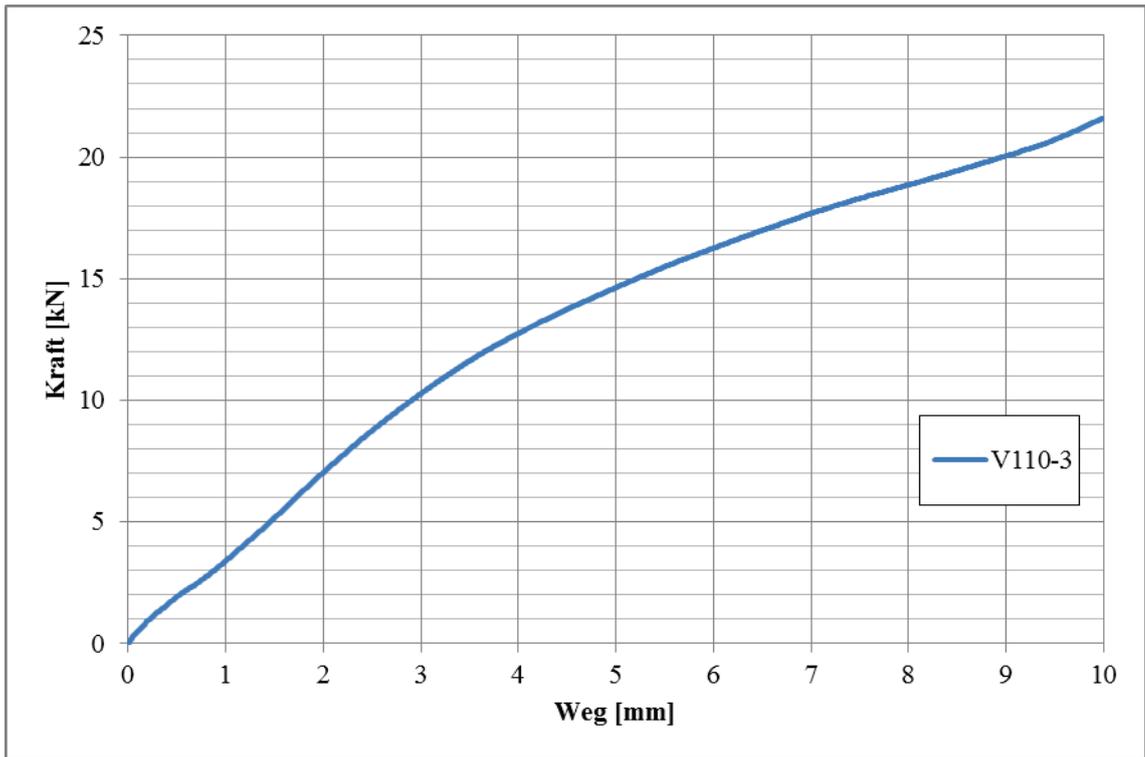


Abbildung 141) Kraftverlauf Wedge-Test V110-3



Abbildung 142) Fotodokumentation Wedge-Test V110-3

### 9.4.5. Anhang D5 – Ergebnisse Stoßversuch

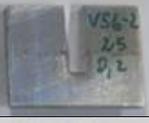
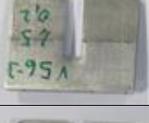
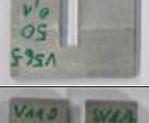
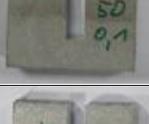
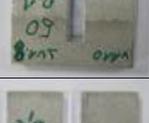
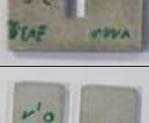
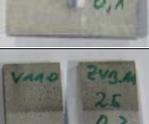
Probendokumentation Stoßversuch			
Versuchsnummer	Hubgeschwindigkeit	Vorschubgeschwindigkeit	Abbildung
	[Hübe/min]	[mm/Hub]	
V51-1	25	0,2	
V51-2	25	0,2	
V51-3	25	0,2	
V51-4	50	0,1	
V51-5	50	0,1	
V110-SV1.7	50	0,1	
V110-SV1.8	50	0,1	
V110-ZV3.1	25	0,2	
V110-ZV3.2	25	0,2	
V110-ZV3.9	50	0,1	
V110-ZV3.10	50	0,1	
V110-ZV3.11	25	0,2	

Tabelle 33) Probendokumentation Stoßversuch

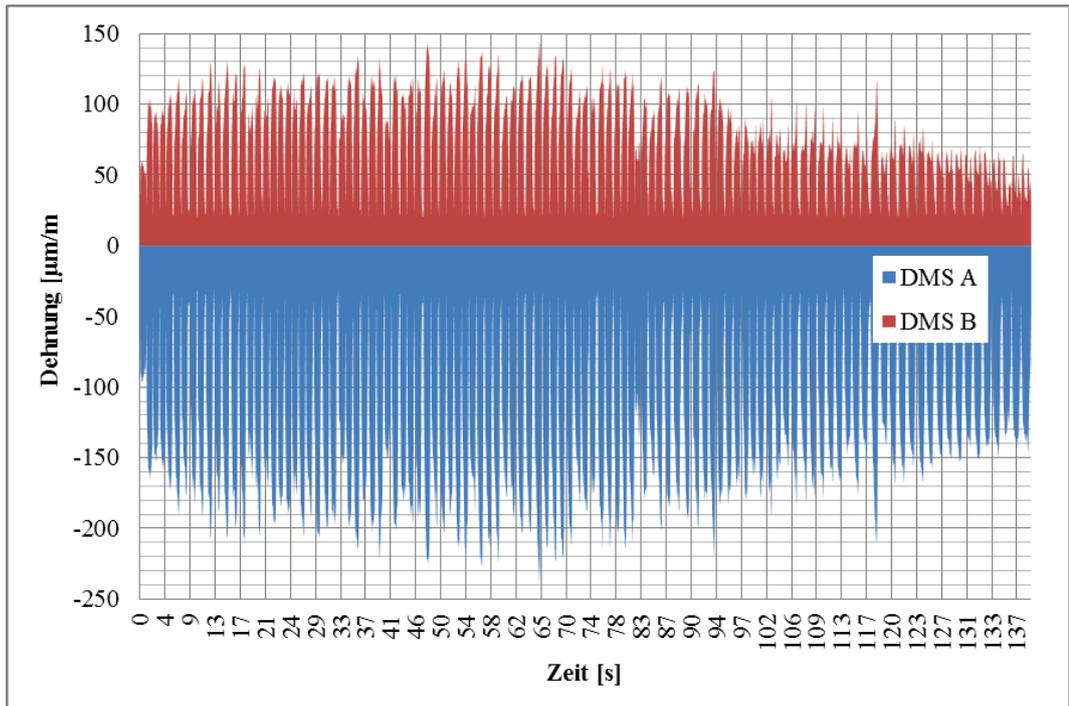


Abbildung 143) Stoßversuch V110-SV1.7

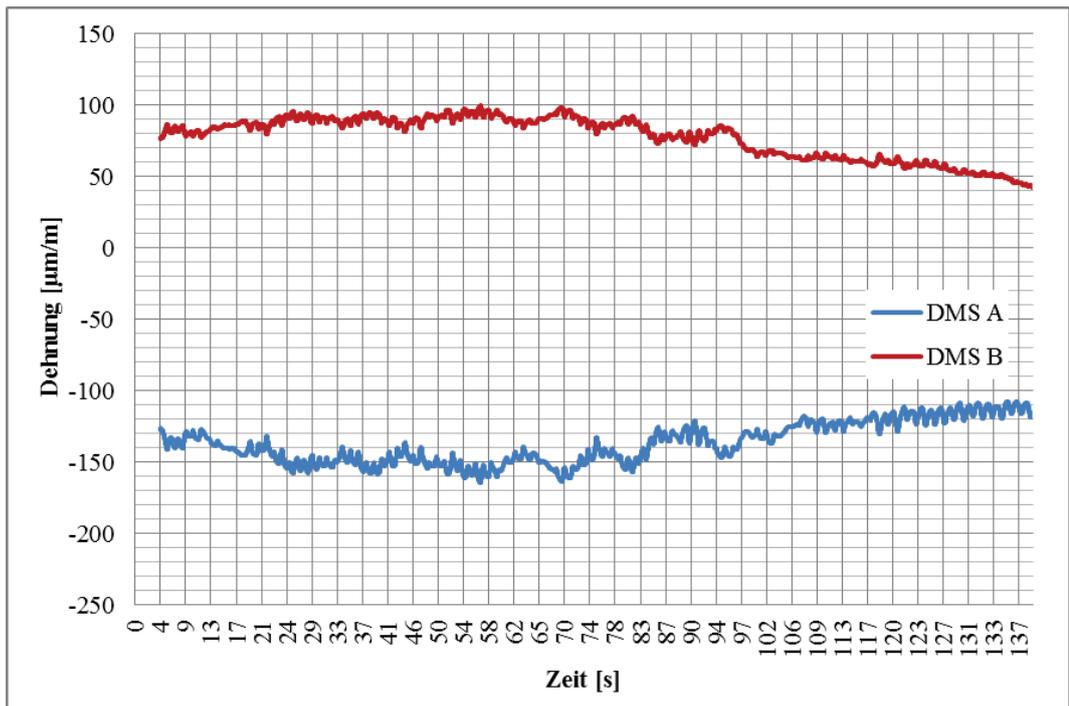


Abbildung 144) Trendlinie Stoßversuch V110-SV1.7

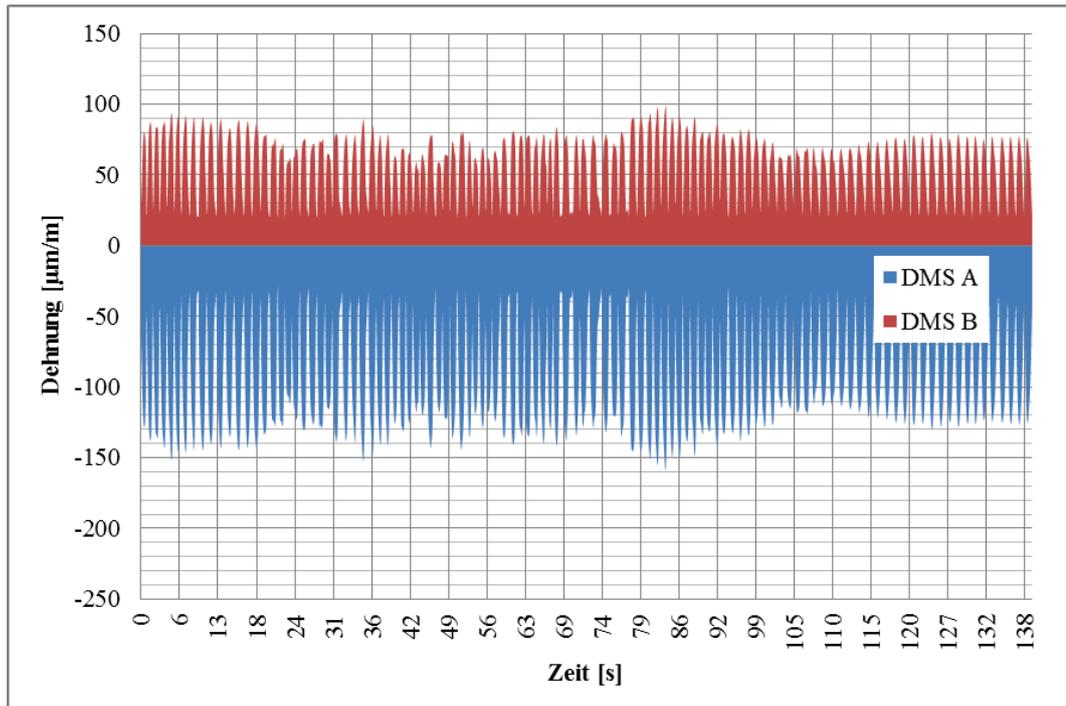


Abbildung 145) Stoßversuch V110-ZV3.10

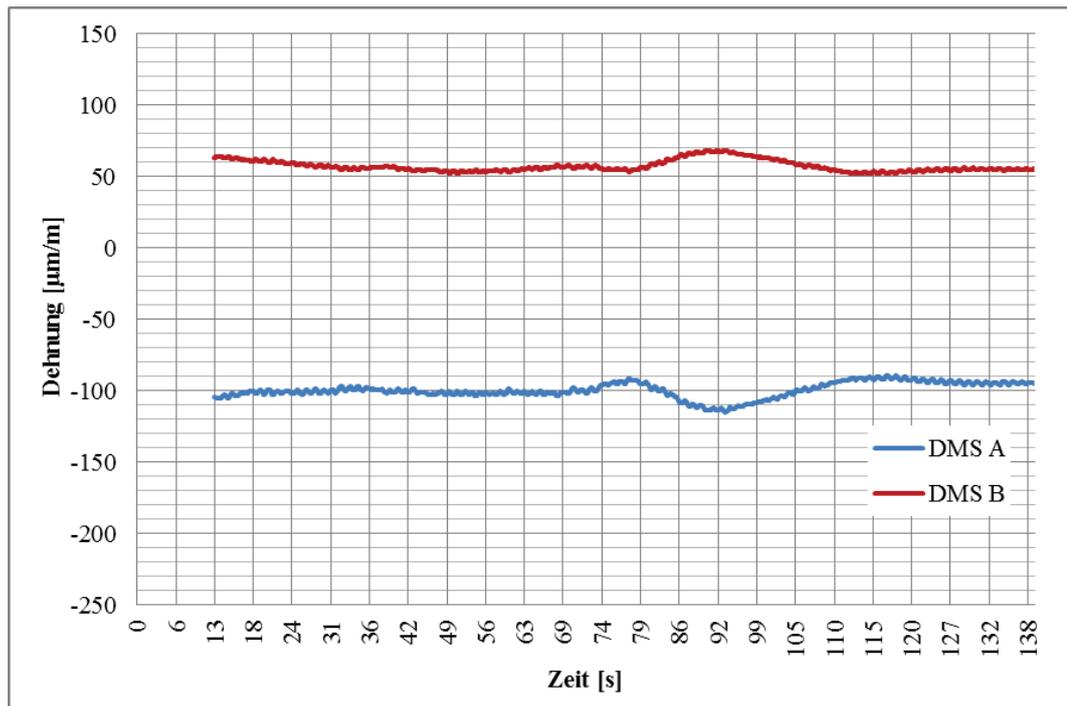


Abbildung 146) Trendlinie Stoßversuch V110-ZV3.10

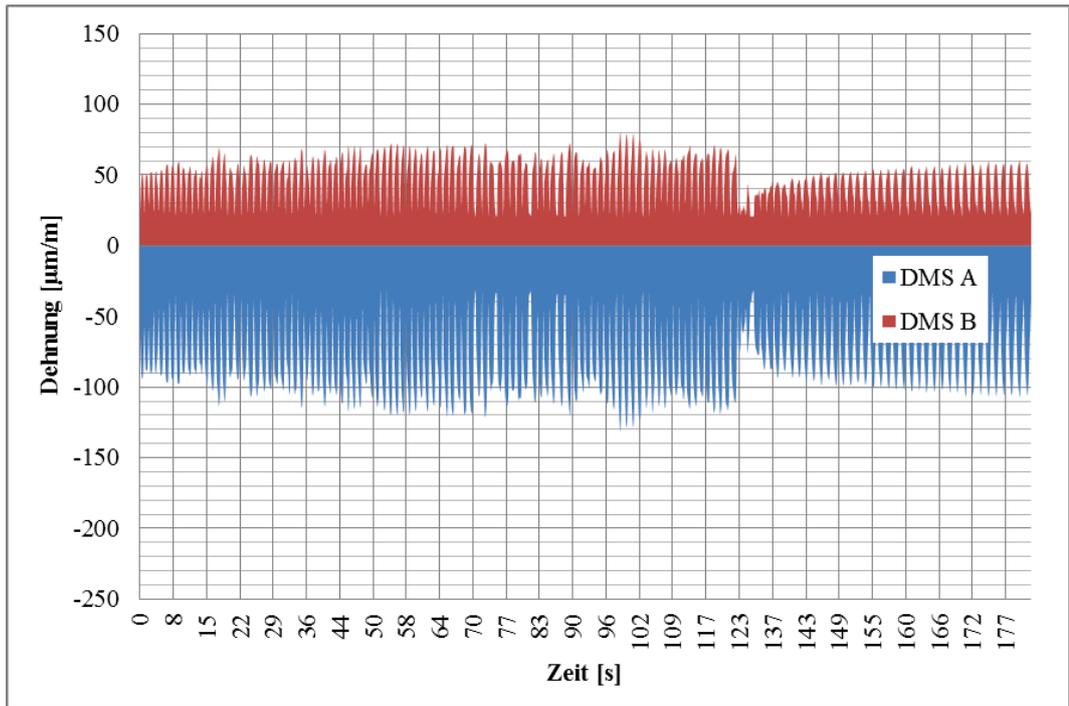


Abbildung 147) Stoßversuch V51-4

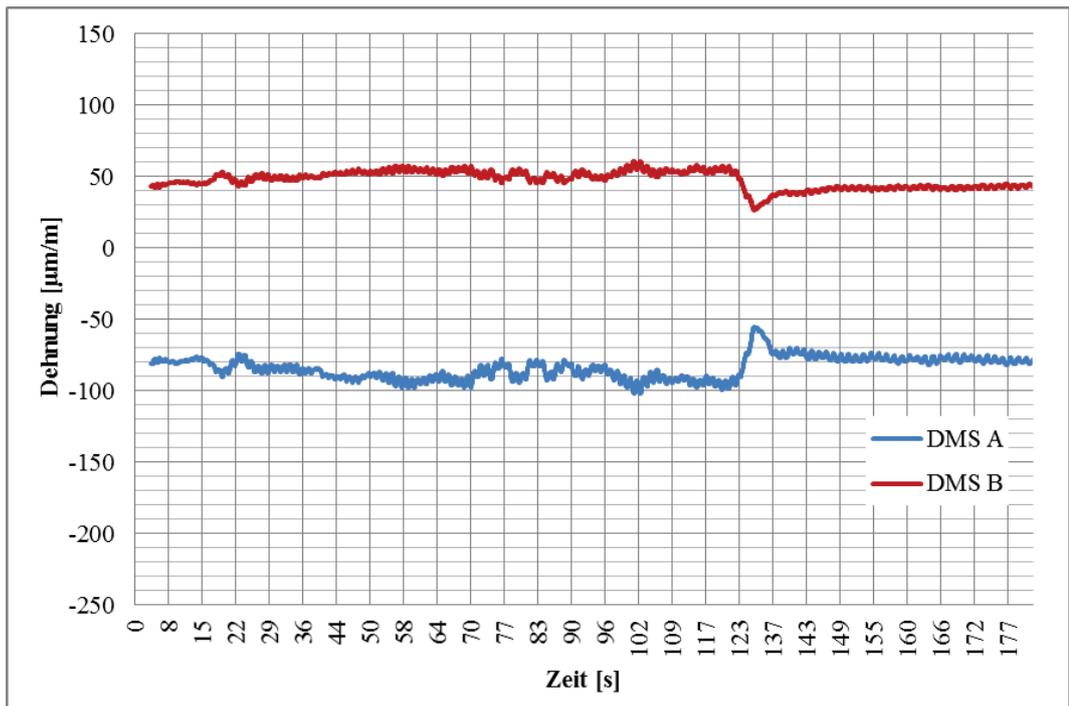


Abbildung 148) Trendlinie Stoßversuch V51-4

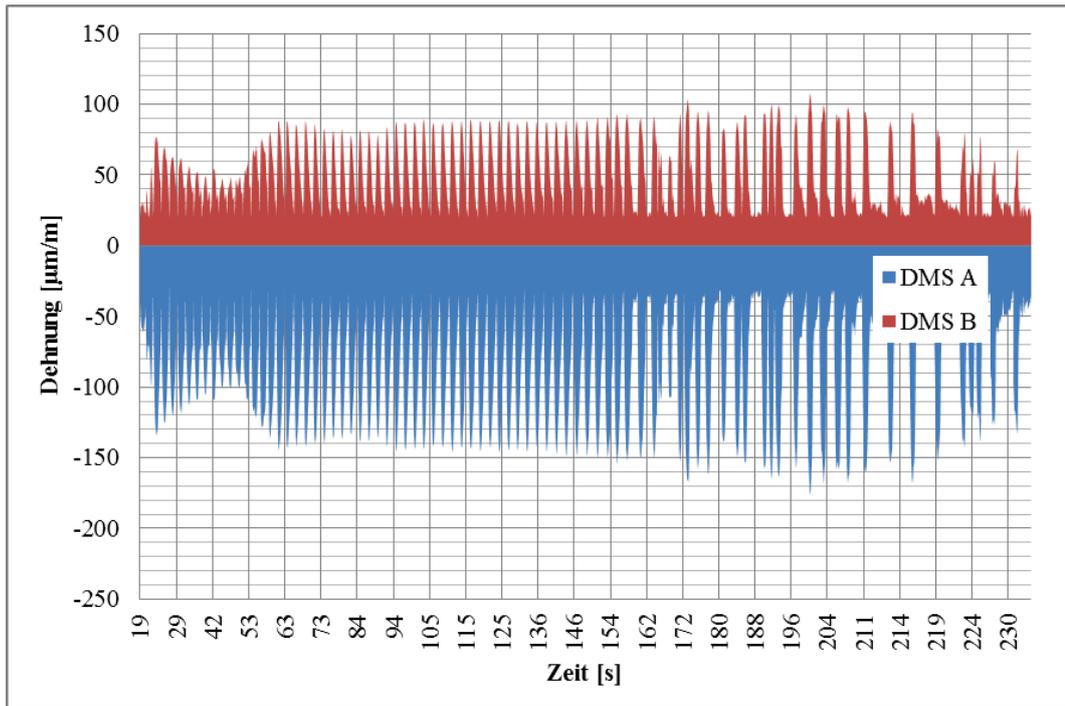


Abbildung 149) Stoßversuch V110-ZV3.2

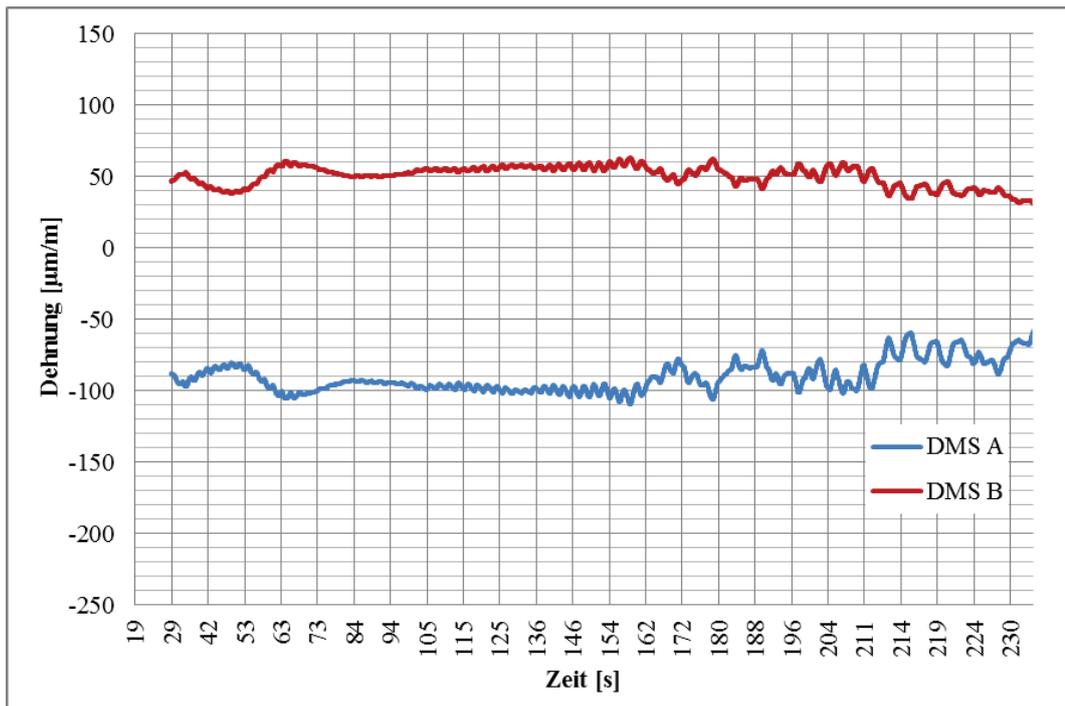


Abbildung 150) Trendlinie Stoßversuch V110-ZV3.2

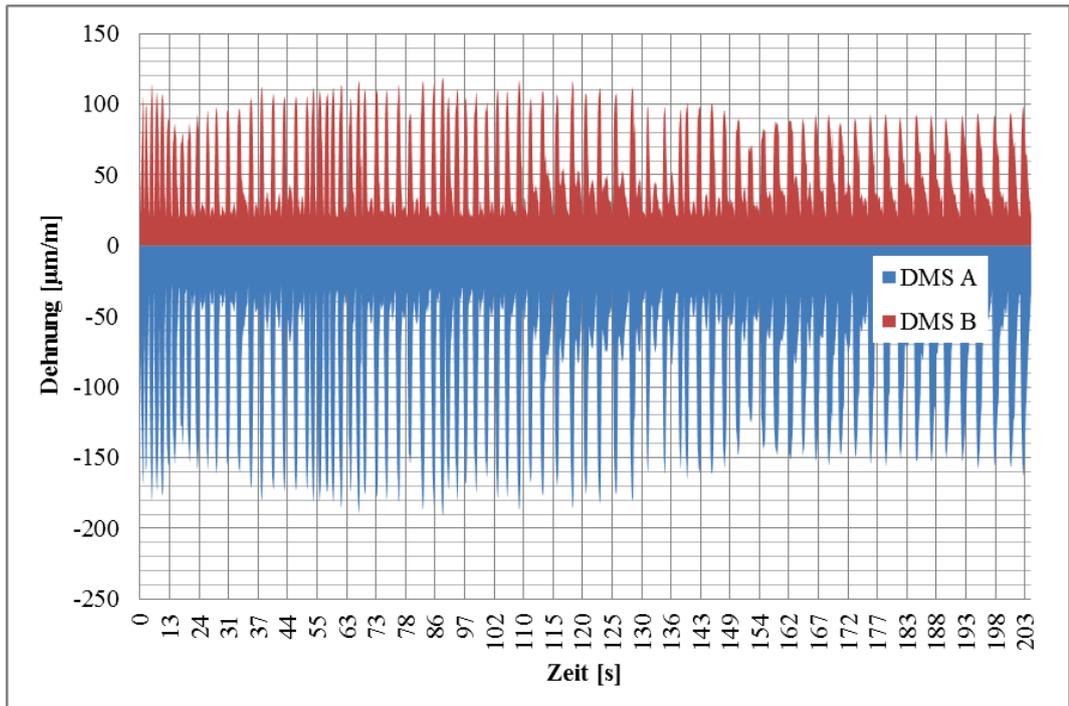


Abbildung 151) Stoßversuch V110-ZV3.11

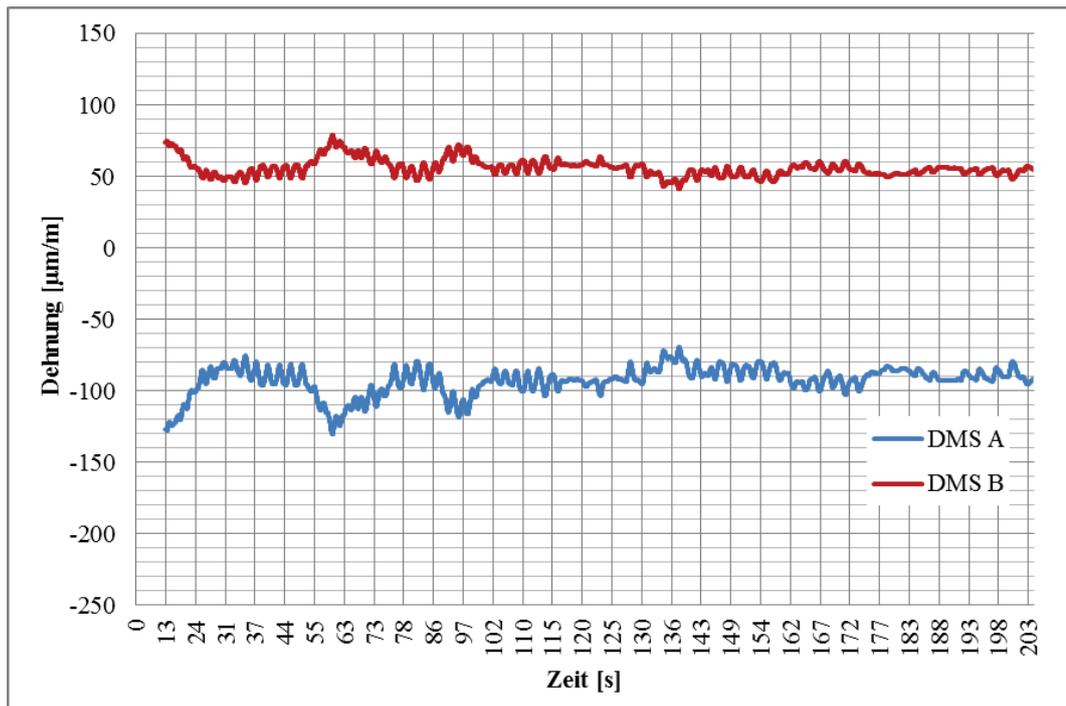


Abbildung 152) Trendlinie Stoßversuch V110-ZV3.11

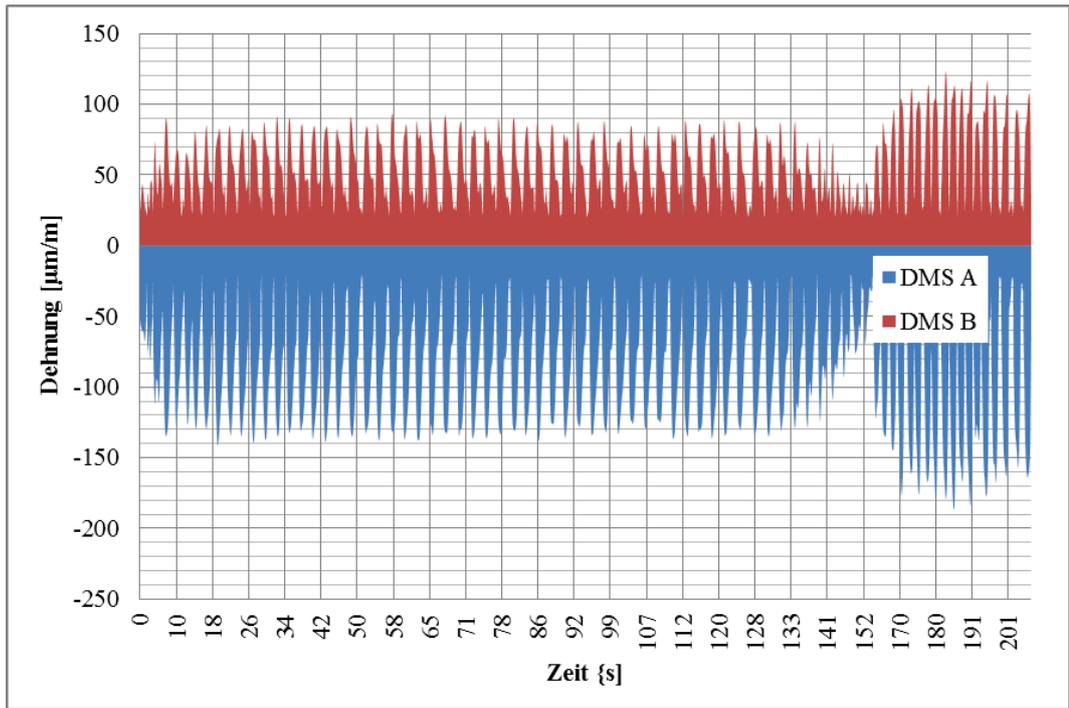


Abbildung 153) Stoßversuch V51-1

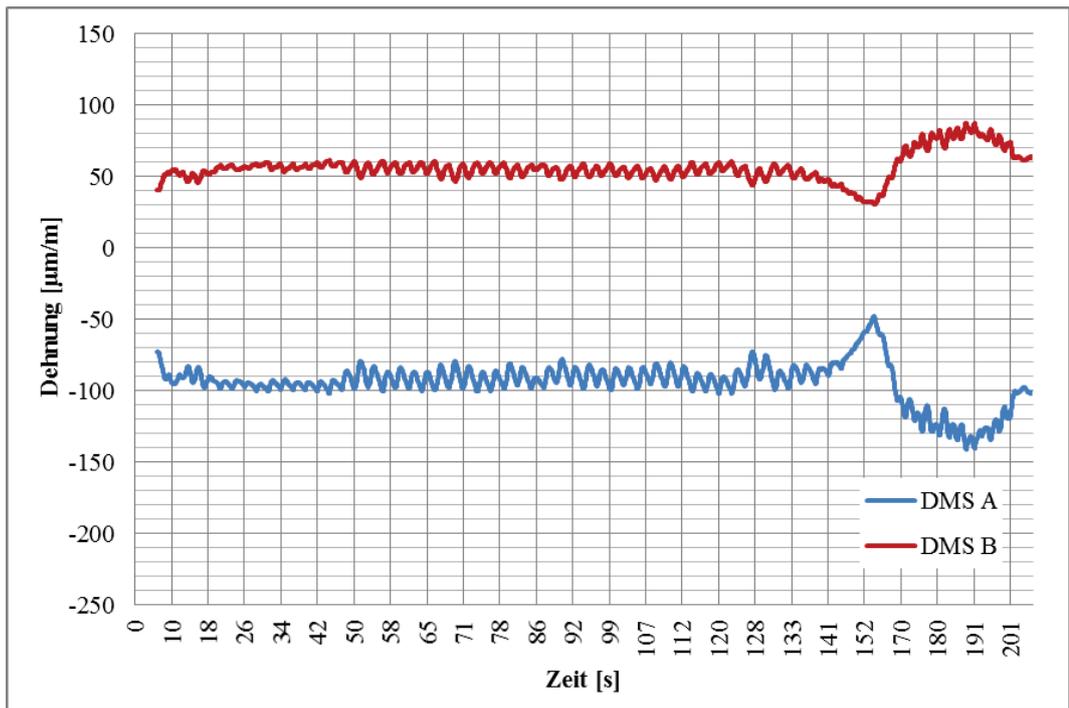


Abbildung 154) Trendlinie Stoßversuch V51-1

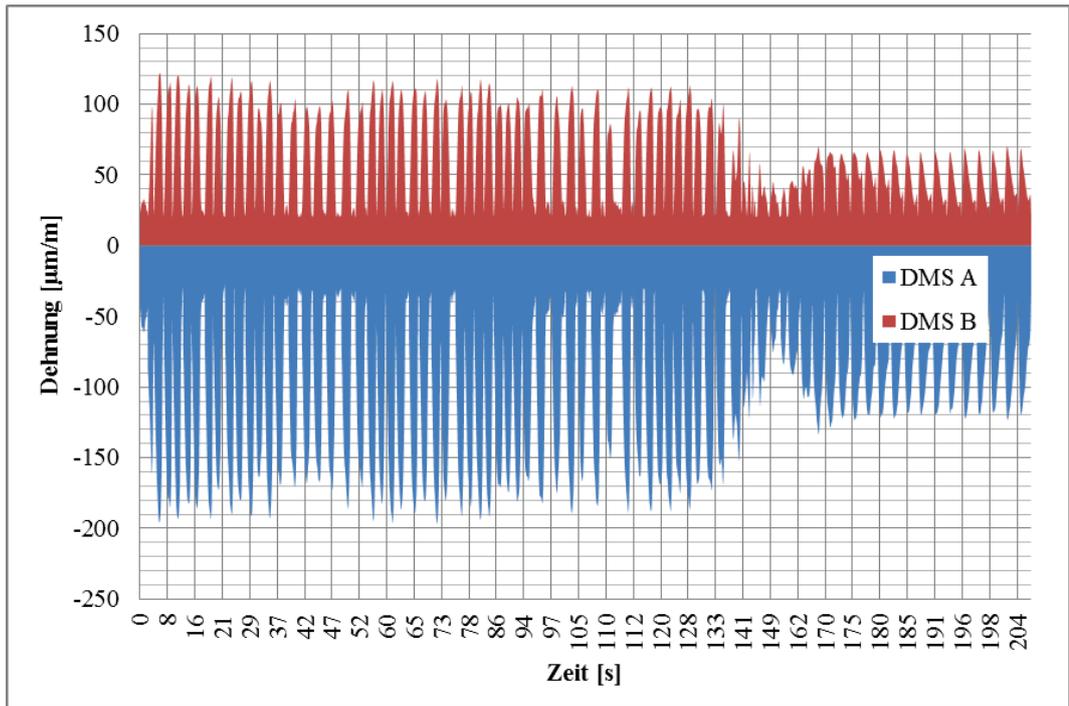


Abbildung 155) Stoßversuch V51-2

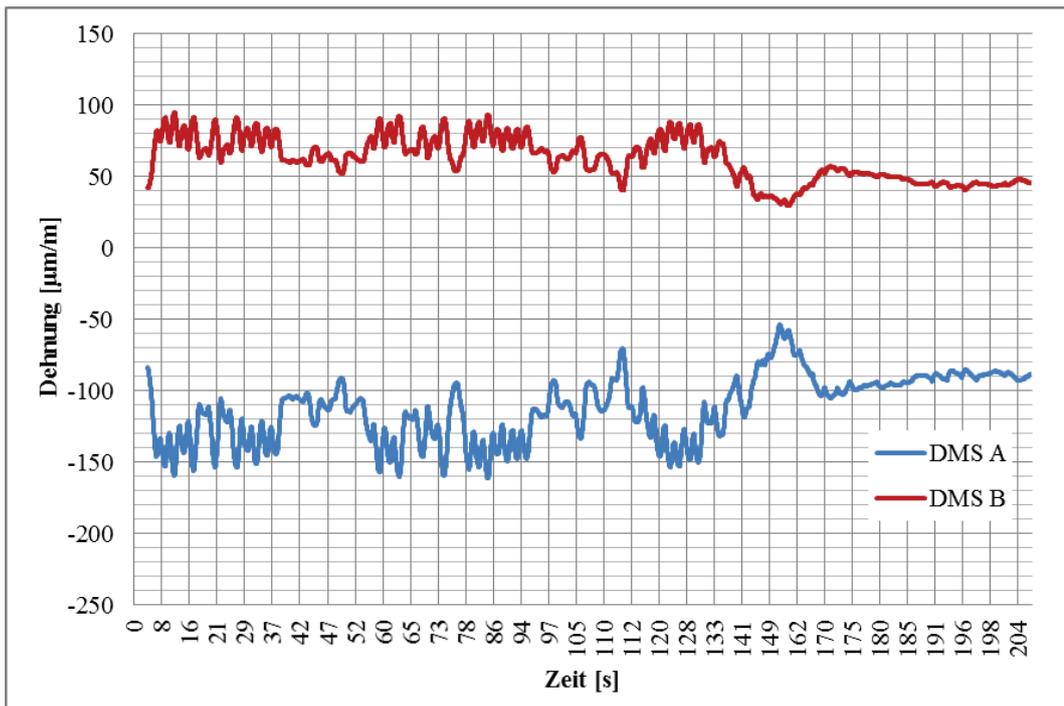


Abbildung 156) Trendlinie Stoßversuch V51-2

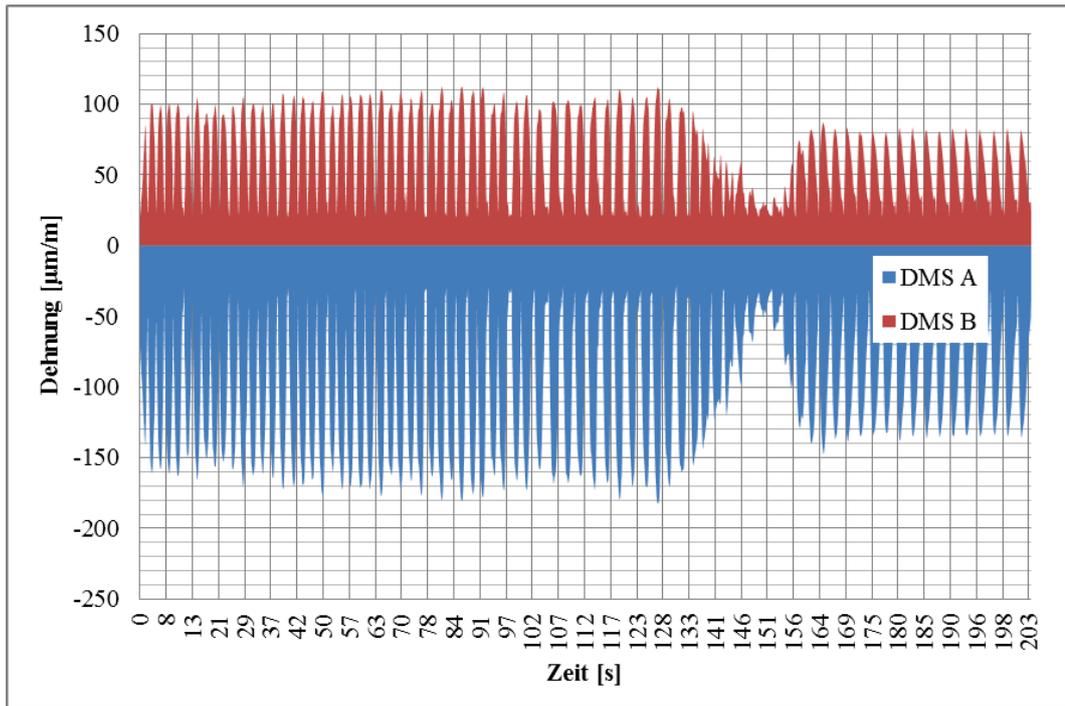


Abbildung 157) Stoßversuch V51-3

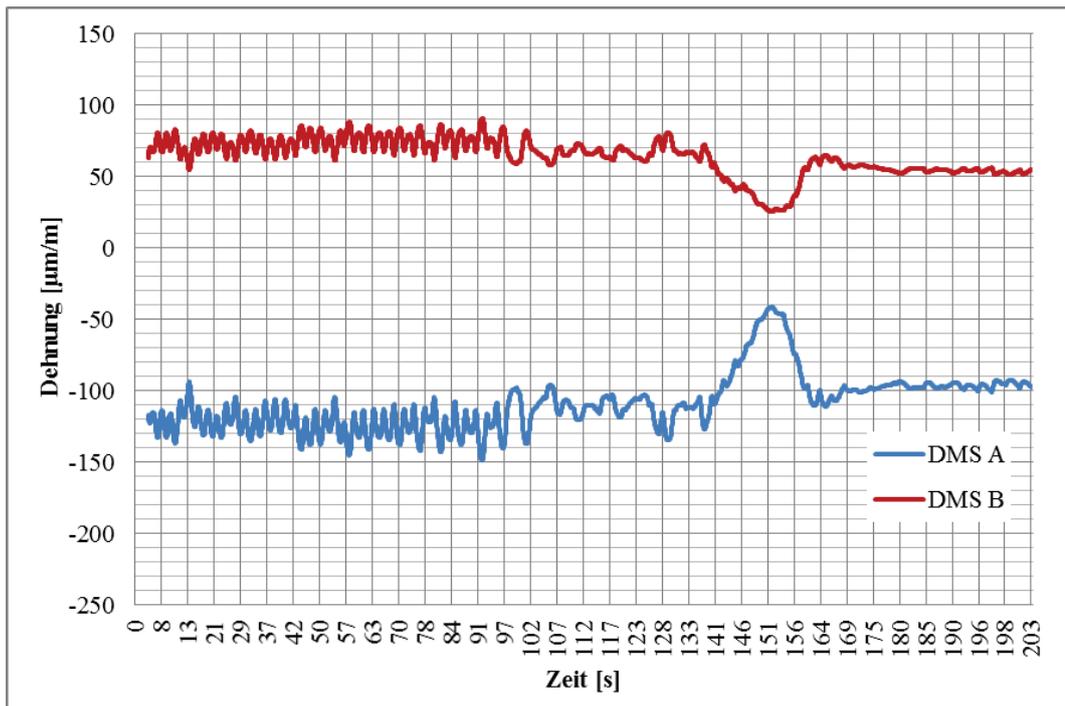


Abbildung 158) Trendlinie Stoßversuch V51-3

#### 9.4.6. Anhang D6 – Ergebnisse Korrelationsüberprüfung

Versuchsnummer	Ergebnisse		
	Zugscherversuch	Zugversuch	Wedge-Test
	Nr.	[N]	[MPa]
V071-01	1565	8	5188
V071-02	1565	4	3440
V070-01	1624	10	4069
V070-02	1624	12	5279
V072-03	2840	25	20140
V072-04	2840	27	21738
V070-03	3011	41	11817
V070-04	3011	61	20490
V101-01	3087	52	19716
V101-02	3087	50	21225
V072-01	3657	46	20140
V072-02	3657	42	21738
V101-03	3922	63	nicht gepr.
V101-04	3922	53	nicht gepr.
V108-01	4068	61	17917
V108-02	4068	66	23941
V110-01	4133	64	18002
V110-02	4133	63	22638
V110-03	4415	62	21585
V110-04	4415	58	nicht gepr.
V110-05	4489	63	nicht gepr.
V110-06	4489	64	nicht gepr.

**Tabelle 34) 1.Gegenüberstellung**

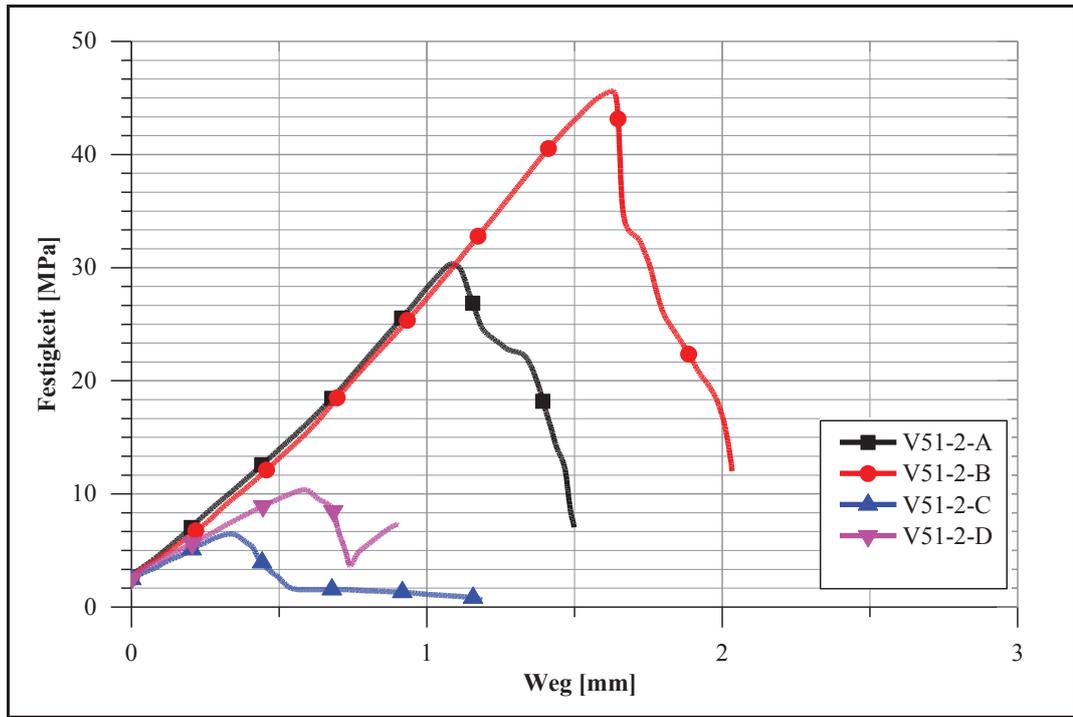


Abbildung 159) Zugversuchskurve Korrelation V51



Abbildung 160) Fotodokumentation Zugversuche Korrelation V51

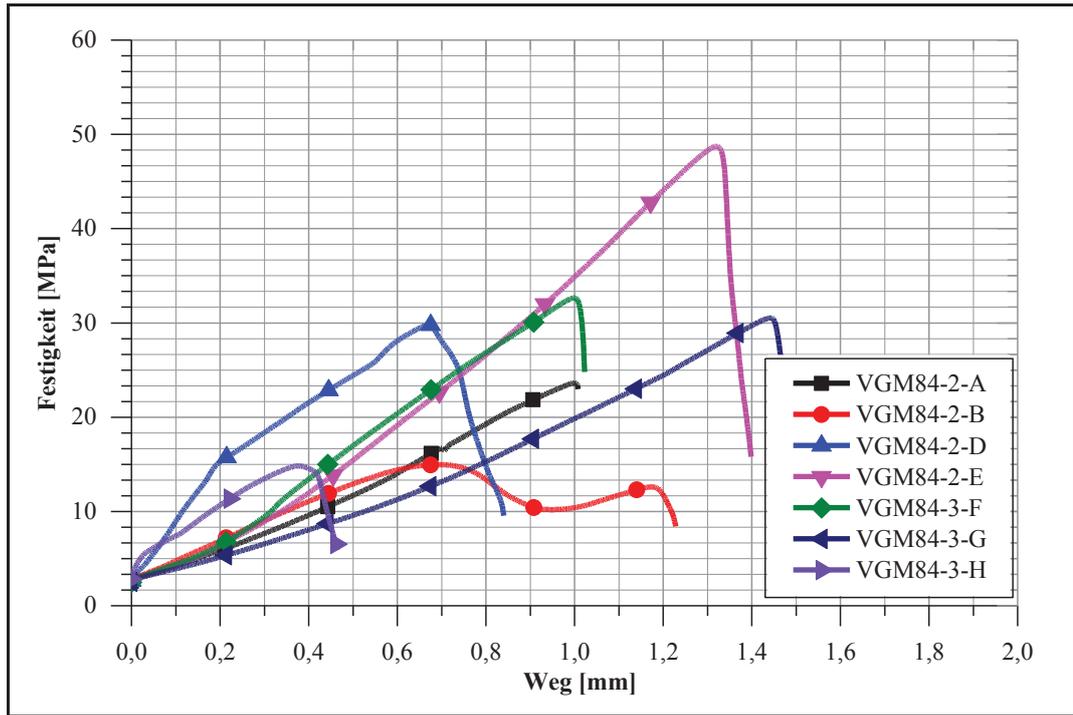


Abbildung 161) Zugversuchskurve Korrelation VGM84

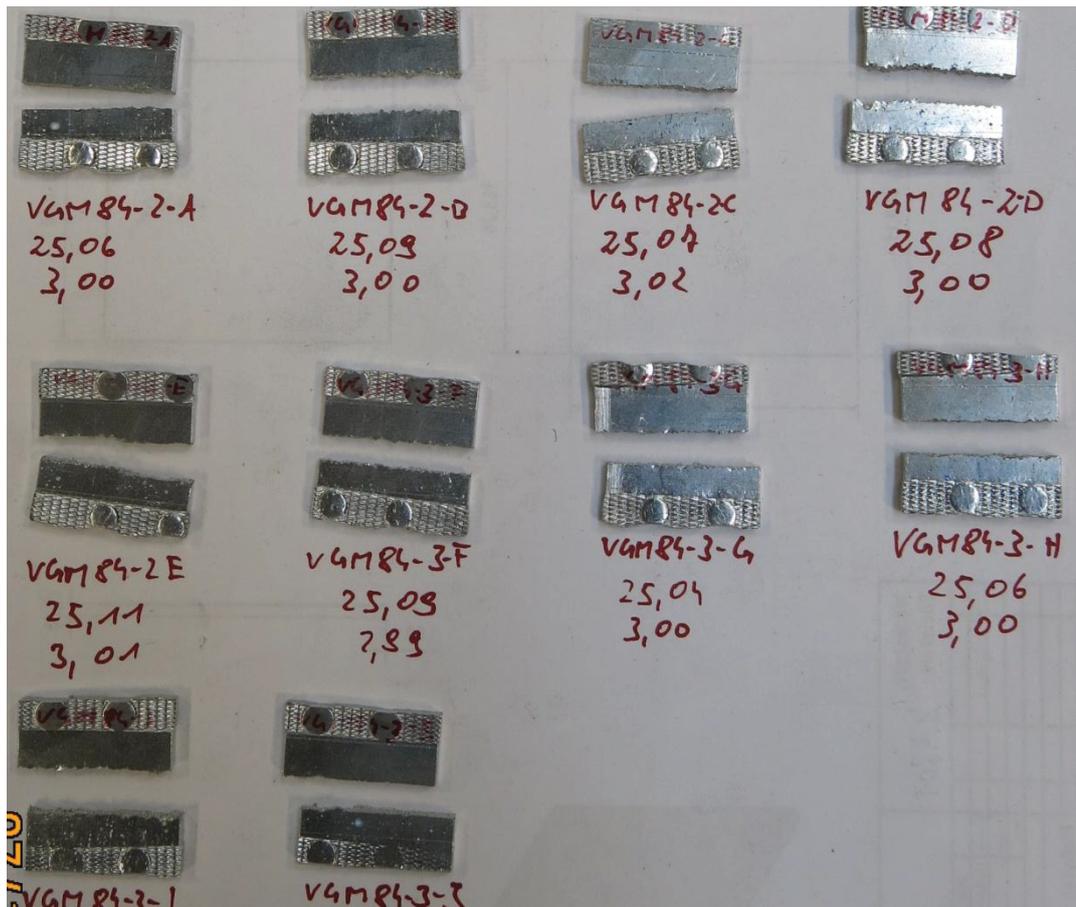


Abbildung 162) Fotodokumentation Zugversuche Korrelation VGM84

## 10. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1) Einsatzbereiche Gleitlager am Beispiel eines 3-Zylinder Reihenmotor [4]	5
Abbildung 2) Aufbau Gleitlager [5]	6
Abbildung 3) Arten des Gleitlagerwerkstoffs [6][7]	6
Abbildung 4) Gegenüberstellung Plattieren vs. Verbundgießen [10]	8
Abbildung 5) Zugversuch (adaptiert für Verbundproben)	10
Abbildung 6) Chalmers-Prüfvorrichtung	12
Abbildung 7) Probenfertigung Chalmers-Test [20]	12
Abbildung 8) Zugscherprobe	13
Abbildung 9) Scherprobe [24]	14
Abbildung 10) Versuchsdurchführung [24]	15
Abbildung 11) Probengeometrie des Schälversuchs [26]	16
Abbildung 12) Halterung zur Auflagerung der Proben für Rollenschälprüfung [26]	16
Abbildung 13) Wedge-Test [29]	17
Abbildung 14) Stoßversuch [39]	18
Abbildung 15) Messprinzip des Stoßversuchs [31]	18
Abbildung 16) Verwindungstest [32]	19
Abbildung 17) Zentrifugentest [35]	20
Abbildung 18) Ollard Test [36]	21
Abbildung 19) Verbundgießanlage Miba Gleitlager GmbH GmbH [37]	22
Abbildung 20) Aufbau der Verbundgießanlage Miba Gleitlager GmbH [37]	23
Abbildung 21) Gussstreifen VGM88	23
Abbildung 22) Aufbau utg-Anlage [38]	24
Abbildung 23) Aufgusseinheit utg-Anlage [38]	24
Abbildung 24) Gussprodukt utg-Anlage [38]	25
Abbildung 25) Zugvorrichtung	27
Abbildung 26) Probenentnahme und Probengeometrie	28
Abbildung 27) Probengeometrie Zentrifugentest	30
Abbildung 28) Prüfungsaufbau Zentrifugentest [40]	31
Abbildung 29) Probenanordnung Zentrifugentest [40]	31
Abbildung 30) Zusammenstellung Wedge-Test	32
Abbildung 31) Probengeometrie Wedge-Test	33
Abbildung 32) Probenhalterung Stoßversuch	34
Abbildung 33) DMS-Positionierung [41]	34
Abbildung 34) Probengeometrie Stoßversuch	35
Abbildung 35) Zugversuch 1. Versuchsreihe	37
Abbildung 36) Zugversuchskurve 92A-2	38
Abbildung 37) Zugversuch 2. Versuchsreihe	38
Abbildung 38) Zugversuchskurven V110 Teil 1	41

Abbildung 39) Bruchbild Zentrifugentest VGM84-2 [39].....	44
Abbildung 40) Aufnahme V110-11 [40].....	45
Abbildung 41) Analyse Kraftanstieg.....	46
Abbildung 42) Fotodokumentation Wedge-Test V70-1.....	47
Abbildung 43) Fotodokumentation Wedge-Test V70-2.....	47
Abbildung 44) Kraftverlauf Wedge-Test V70-1/2.....	47
Abbildung 45) Wedge-Test V110-1.....	48
Abbildung 46) Wedge-Test V110-2.....	48
Abbildung 47) Kraftverlauf Wedge-Test V110-1/2.....	49
Abbildung 48) Wedge-Test V70-3.....	50
Abbildung 49) Wedge-Test V70-4.....	50
Abbildung 50) Kraftverlauf Wedge-Test V70-3/4.....	50
Abbildung 51) Stoßversuch-1.Test (V110-SV1.12).....	52
Abbildung 52) Stoßversuch mit Masseschluss [41].....	53
Abbildung 53) Stoßversuch V110-SV1.08.....	54
Abbildung 54) Trendlinie Stoßversuch V110-SV1.08.....	54
Abbildung 55) Stoßversuch V110-ZV3.9.....	55
Abbildung 56) Trendlinie Stoßversuch V110-ZV3.9.....	55
Abbildung 57) Stoßversuch V51-5.....	56
Abbildung 58) Trendlinie Stoßversuch V51-5.....	56
Abbildung 59) Stoßversuch V110-ZV3.1.....	57
Abbildung 60) Trendlinie Stoßversuch V110-ZV3.1.....	58
Abbildung 61) Korrelation Zugscherversuch/Zugversuch/Wedge-Test Teil 1.....	59
Abbildung 62) Korrelation Zugscherversuch/Zugversuch/Wedge-Test Teil 2.....	60
Abbildung 63) Ergebnisse Zugversuch V51-2C vs. Stoßversuch V51-5.....	61
Abbildung 64) Ergebnisse Zugversuch V110 vs. Stoßversuch V110-SV1.08.....	62
Abbildung 65) Zeichnung Prüfkeil Wedge-Test.....	78
Abbildung 66) Zeichnung Probenhalterung Wedge-Test.....	79
Abbildung 67) Klemmbacke 80mm Teil 1.....	80
Abbildung 68) Klemmbacke 80mm Teil 2.....	81
Abbildung 69) Zeichnung Zugproben-Reinmaterial [44].....	82
Abbildung 70) Zugversuchskurve VGM92.....	83
Abbildung 71) Fotodokumentation Zugversuch VGM92.....	83
Abbildung 72) Zugversuchskurve VGM93.....	84
Abbildung 73) Fotodokumentation Zugversuch VGM93.....	84
Abbildung 74) Zugversuchskurve VGM94.....	85
Abbildung 75) Fotodokumentation Zugversuch VGM94.....	85
Abbildung 76) Zugversuchskurve VGM96.....	86
Abbildung 77) Fotodokumentation Zugversuch VGM96.....	86
Abbildung 78) Zugversuchskurve VGM96_HT.....	87

Abbildung 79) Fotodokumentation Zugversuch VGM96_HT .....	87
Abbildung 80) Zugversuchskurve VGM97 .....	88
Abbildung 81) Fotodokumentation Zugversuch VGM97 .....	88
Abbildung 82) Zugversuchskurve VGM97_HT .....	89
Abbildung 83) Fotodokumentation Zugversuch VGM97_HT .....	89
Abbildung 84) Zugversuchskurve VGM84 .....	90
Abbildung 85) Fotodokumentation Zugversuch VGM84 .....	90
Abbildung 86) Zugversuchskurve VGM92_HT .....	91
Abbildung 87) Fotodokumentation Zugversuch VGM92_HT .....	91
Abbildung 88) Zugversuchskurve VGM93_HT .....	92
Abbildung 89) Fotodokumentation Zugversuch VGM93_HT .....	92
Abbildung 90) Zugversuchskurve VGM94_HT .....	93
Abbildung 91) Fotodokumentation Zugversuch VGM94_HT .....	93
Abbildung 92) Zugversuch Einspannungstest Teil 1 .....	94
Abbildung 93) Zugversuch Einspannungstest Teil 2 .....	94
Abbildung 94) Zugversuch Einspannungstest Teil 3 .....	95
Abbildung 95) Fotodokumentation Zugversuch Einspannungstest .....	96
Abbildung 96) Zugversuchskurve V70 .....	97
Abbildung 97) Fotodokumentation Zugversuch V70 .....	97
Abbildung 98) Zugversuchskurven V71 .....	98
Abbildung 99) Fotodokumentation Zugversuch V71 .....	98
Abbildung 100) Zugversuchskurven V72 .....	99
Abbildung 101) Fotodokumentation Zugversuch V72 .....	99
Abbildung 102) Zugversuchskurven V101 .....	100
Abbildung 103) Fotodokumentation Zugversuch V101 .....	100
Abbildung 104) Zugversuchskurve V108 .....	101
Abbildung 105) Fotodokumentation Zugversuch V108 .....	101
Abbildung 106) Zugversuchskurve V110 Teil 1 .....	102
Abbildung 107) Zugversuchskurve V110 Teil 2 .....	102
Abbildung 108) Fotodokumentation Zugversuch V110 .....	103
Abbildung 109) Zugversuchskurve VGM79 .....	104
Abbildung 110) Fotodokumentation Zugversuch VGM79 .....	104
Abbildung 111) Zugversuchskurven VGM87 .....	105
Abbildung 112) Fotodokumentation Zugversuch VGM87 .....	105
Abbildung 113) Zugversuchskurve VGM88 .....	106
Abbildung 114) Fotodokumentation Zugversuch VGM88 .....	106
Abbildung 115) Zugversuchskurve VGM89 .....	107
Abbildung 116) Fotodokumentation Zugversuch VGM89 .....	107
Abbildung 117) Zugversuchskurve VGM101 .....	108
Abbildung 118) Fotodokumentation Zugversuch VGM101 .....	108

Abbildung 119) Zugversuchskurve Komponenten VGM84 .....	109
Abbildung 120) Fotodokumentation Zugversuch Komponenten VGM84 .....	109
Abbildung 121) Zugversuchskurven Komponenten V51.....	110
Abbildung 122) Fotodokumentation Zugversuch Komponenten V51 .....	110
Abbildung 123) Zugversuchskurven Komponenten V110.....	111
Abbildung 124) Fotodokumentation Zugversuch Komponenten V110.....	111
Abbildung 125) Bruchbilder Zentrifugentest VGM84 [38] .....	112
Abbildung 126) Bruchbilder Zentrifugentest VGM84 [38] .....	113
Abbildung 127) Zentrifugentest V110 - 1.Bild [39] .....	114
Abbildung 128) Zentrifugentest V110 - 2.Bild [39].....	115
Abbildung 129) Kraftverlauf Wedge-Test V71-1/2 .....	116
Abbildung 130) Fotodokumentation Wedge-Test V71-1 .....	116
Abbildung 131) Fotodokumentation Wedge-Test V71-2 .....	116
Abbildung 132) Kraftverlauf Wedge-Test V72-1/2 .....	117
Abbildung 133) Fotodokumentation Wedge-Test V72-1 .....	117
Abbildung 134) Fotodokumentation Wedge-Test V72-2 .....	117
Abbildung 135) Kraftverlauf Wedge-Test V101-1/2.....	118
Abbildung 136) Fotodokumentation Wedge-Test V101-1 .....	118
Abbildung 137) Fotodokumentation Wedge-Test V101-2 .....	118
Abbildung 138) Kraftverlauf Wedge-Test V108-1/2.....	119
Abbildung 139) Fotodokumentation Wedge-Test V108-1 .....	119
Abbildung 140) Fotodokumentation Wedge-Test V108-2 .....	119
Abbildung 141) Kraftverlauf Wedge-Test V110-3 .....	120
Abbildung 142) Fotodokumentation Wedge-Test V110-3 .....	120
Abbildung 143) Stoßversuch V110-SV1.7.....	122
Abbildung 144) Trendlinie Stoßversuch V110-SV1.7.....	122
Abbildung 145) Stoßversuch V110-ZV3.10 .....	123
Abbildung 146) Trendlinie Stoßversuch V110-ZV3.10.....	123
Abbildung 147) Stoßversuch V51-4.....	124
Abbildung 148) Trendlinie Stoßversuch V51-4.....	124
Abbildung 149) Stoßversuch V110-ZV3.2 .....	125
Abbildung 150) Trendlinie Stoßversuch V110-ZV3.2.....	125
Abbildung 151) Stoßversuch V110-ZV3.11 .....	126
Abbildung 152) Trendlinie Stoßversuch V110-ZV3.11.....	126
Abbildung 153) Stoßversuch V51-1.....	127
Abbildung 154) Trendlinie Stoßversuch V51-1 .....	127
Abbildung 155) Stoßversuch V51-2.....	128
Abbildung 156) Trendlinie Stoßversuch V51-2.....	128
Abbildung 157) Stoßversuch V51-3.....	129
Abbildung 158) Trendlinie Stoßversuch V51-3 .....	129

Abbildung 159) Zugversuchskurve Korrelation V51 .....	131
Abbildung 160) Fotodokumentation Zugversuche Korrelation V51 .....	131
Abbildung 161) Zugversuchskurve Korrelation VGM84 .....	132
Abbildung 162) Fotodokumentation Zugversuche Korrelation VGM84.....	132

## 11. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1) Matrix der Haftfestigkeitsprüfverfahren .....	9
Tabelle 2) Parameter Klemmbackenberechnung.....	26
Tabelle 3) Ergebnisse Klemmbackenberechnung .....	26
Tabelle 4) Probengeometrie Zugversuch.....	27
Tabelle 5) Prüfparameter Zugversuch .....	28
Tabelle 6) Parameter Berechnungen Zentrifugentest .....	29
Tabelle 7) Ergebnisse Berechnungen Zentrifugentest.....	29
Tabelle 8) Parameter Probengeometrie Zentrifugentest .....	30
Tabelle 9) Prüfparameter Zentrifugentest .....	31
Tabelle 10) Parameter Probengeometrie Wedge-Test.....	32
Tabelle 11) Prüfparameter Wedge-Test .....	33
Tabelle 12) Parameter Stoßkraftberechnung .....	33
Tabelle 13) Ergebnisse Stoßkraftberechnung.....	34
Tabelle 14) Probengeometrie Stoßversuch.....	35
Tabelle 15) Prüfparameter Stoßversuch .....	35
Tabelle 16) VGM-Versuche 5mm Proben .....	37
Tabelle 17) VGM-Versuche 2,5mm Proben .....	38
Tabelle 18) Ergebnisse Einspannungstests V51 .....	39
Tabelle 19) Ergebnisse Zugprüfung Teil 1 .....	40
Tabelle 20) Ergebnisse Zugprüfung Teil 2.....	40
Tabelle 21) VGM-Versuche 3mm Proben .....	41
Tabelle 22) Zugfestigkeit der Einzelkomponente der Verbunde .....	42
Tabelle 23) Ergebnisse utg-Proben .....	43
Tabelle 24) Ergebnisse VGM-Proben .....	43
Tabelle 25) Angepasste Ergebnisse.....	44
Tabelle 26) Ergebnisse Zentrifugentest 2.Versuchsreihe.....	45
Tabelle 27) Ergebnisse Wedge-Test.....	51
Tabelle 28) Gegenüberstellung der Versuche .....	59
Tabelle 29) 3.Gegenüberstellung-Originale Werte .....	63
Tabelle 30) 3.Gegenüberstellung-Angepasste Werte.....	63
Tabelle 31) Probendokumentation Verbundgussmodul-Material .....	76
Tabelle 32) Probendokumentation utg-Material .....	77
Tabelle 33) Probendokumentation Stoßversuch.....	121
Tabelle 34) 1.Gegenüberstellung.....	130