

4 Ergebnisse

4.1 Ergebnisse aus dem Zugversuch

Die Zugversuchsergebnisse, die hier in Prozentzahlen dargestellt werden, ergeben sich aus dem Mittelwert der ungefügten Serie 1, die in Bezug zu der jeweils zu vergleichenden Serie gestellt wird (Abb. 5, Tab. 5)

Für jede Serie wurde aus den Ergebnissen eine Tabelle erstellt, die die Einzelergebnisse jedes Prüfkörpers sowie des Mittelwertes, der Standardabweichung und des Variationskoeffizienten darstellt. Die Messwerte finden sich im Anhang.

Für das Neumaterial der Serie 1 ergab sich eine mittlere Zugfestigkeit von 829 ± 31 MPa. Bei der ebenfalls ungefügten Serie aus Altmaterial (Serie 2) ließen sich für die mittlere Zugfestigkeit 838 ± 34 MPa ermitteln. Die Standardabweichungen von Serie 1 und 2 liegen mit 31 bzw. 34 MPa deutlich unter der aller anderen Serien.

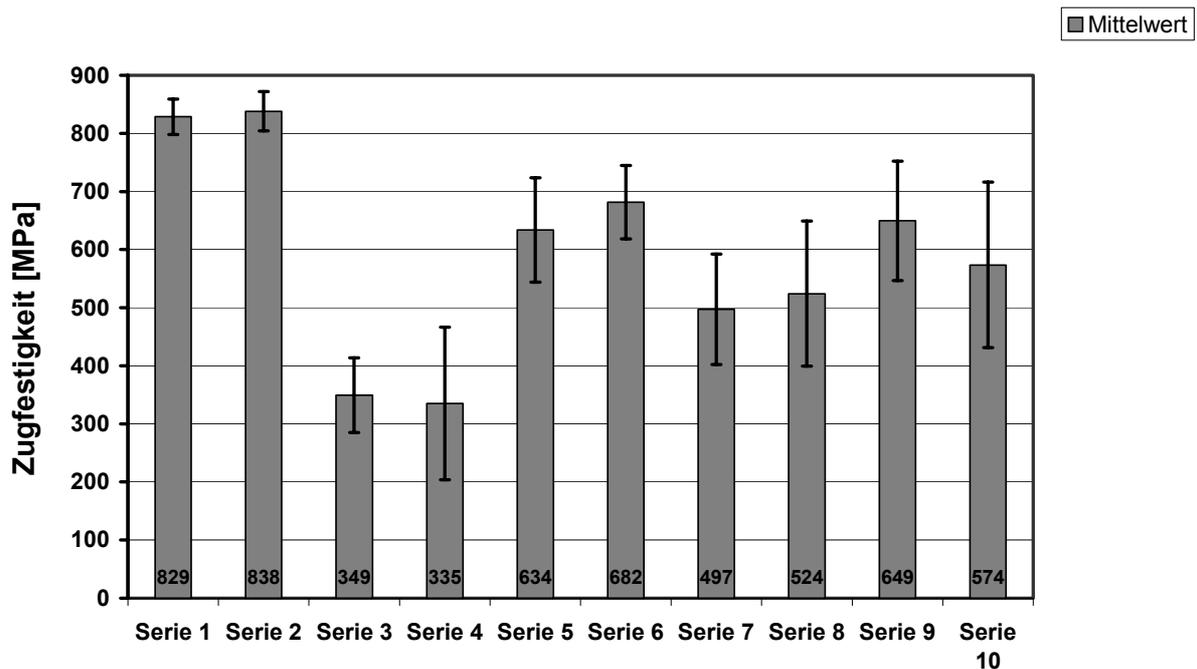


Abb. 5: Zugfestigkeit Serie 1-10

In Abb. 5 wird mittelwertig die Zugfestigkeit (grauer Balken) sowie darin Schwarz abgesetzt die Standardabweichung der jeweiligen Serien dargestellt.

| Serie | Material | Fügestand | Korrosionszustand |
|-------|-------------|--------------------------------|-------------------|
| 1 | Neumaterial | ungefügt | nicht korrodiert |
| 2 | Altmaterial | ungefügt | nicht korrodiert |
| 3 | Neumaterial | gelötet | nicht korrodiert |
| 4 | Neumaterial | gelötet | korrodiert |
| 5 | Neumaterial | gelasert stumpf | nicht korrodiert |
| 6 | Neumaterial | gelasert stumpf | korrodiert |
| 7 | Altmaterial | gelasert stumpf | nicht korrodiert |
| 8 | Altmaterial | gelasert stumpf | korrodiert |
| 9 | Neumaterial | gelasert mit Zulegematerial | nicht korrodiert |
| 10 | Neumaterial | gelasert mit Zulegematerial | korrodiert |

Tab. 5: Serienaufschlüsselung der Prüfkörper

Die Ergebnisse der Serie 3, gelötete Prüfkörper ohne Einlagerung in Kunstspeichel, weisen von den angefertigten 8 Prüfkörpern 4 auf, die die geforderte minimale Zugfestigkeit von 350 MPa (nach DIN EN 29333) erreichen konnten. Sie erreichten damit 42 % (349 ± 64 MPa) der Zugfestigkeit der ungefügten Serie 1 (ebenfalls nicht in Kunstspeichel eingelagert). Von der Serie 4 mit Einlagerung in Kunstspeichel erreichten nur 3 Prüfkörper die minimalen Zugfestigkeitswerte. Damit erlangten sie 40 % (335 ± 131 MPa) der Festigkeit der Serie 1.

Die Laserschweißungen (Stoß auf Stoß) an Neumaterial ohne Zulegematerial (Serie 5) liegen in ihrer Zugfestigkeit bei 77 % (634 ± 90 MPa), Serie 6 erreicht 82 % (682 ± 63 MPa) der Werte von Serie 1.

Wird das Ausgangsmaterial Altmaterial mit der gleichen Fügemethode (Laserschweißen Stoß auf Stoß ohne Zulegematerial) betrachtet, werden bei Serie 7 59 % (479 ± 95 MPa) der Zugfestigkeit erreicht und bei Serie 8 63 % (524 ± 125 MPa). Die Zugfestigkeit der Probekörper aus Neumaterial liegt somit höher als die der

Probekörper aus Altmaterial. Zusätzlich ist festzustellen, dass die in Korrosionslösung eingelagerten Proben keine Einbußen in ihrer Zugfestigkeit aufweisen, sondern in diesen Versuchen sogar höhere Werte erzielen als die nicht eingelagerten Prüfkörper. Das gilt sowohl für die Prüfkörper aus Neu- als auch aus Altmaterial.

Die Laserschweißnaht mit Zulegematerial erreicht an den Probekörpern aus Neumaterial eine Festigkeit von 78 % (649 ± 103 MPa) bei Serie 9 und 69 % (574 ± 142 MPa) bei Serie 10. Sie liegt damit in ihrer Festigkeit nur geringfügig über den erreichten Werten der Serie 5, die Standardabweichung von Serie 9 ist mit 103 MPa jedoch höher.

4.2 Beziehung der Zugfestigkeitswerte zur Dehngrenze

Die Dehngrenze stellt, wie im Schrifttum erklärt, die Spannung dar, bei der der Werkstoff 0,2 % plastische Verformung, bezogen auf seine Ausgangslänge, erfahren hat.

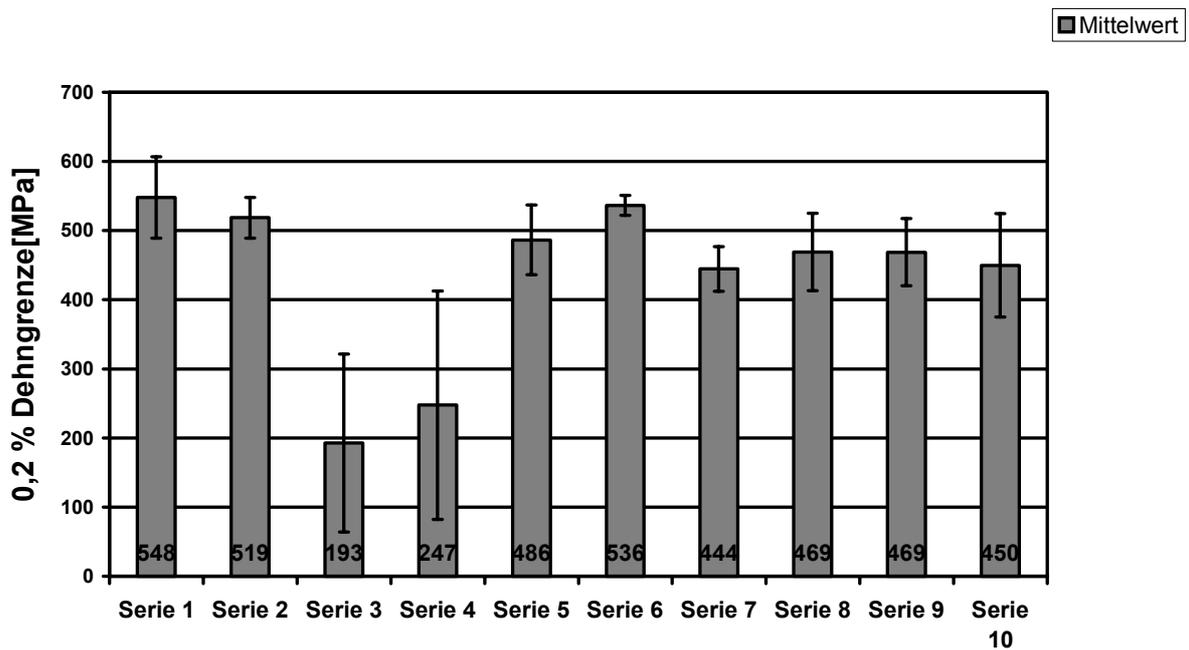


Abb. 6: Dehngrenze Serie 1-10

Aus dem aufgeführten Diagramm (Abb. 6) der Dehngrenze lässt sich entnehmen, dass nach den ungefügten Serien 1 (548 ± 59 MPa) und 2 (519 ± 30 MPa) die höchsten Werte der Dehngrenze bei den Serien 5 (486 ± 50 MPa) und 6 (536 ± 14 MPa), das heißt bei den aus Neumaterial stumpf gelaserten Prüfkörpern, erreicht

werden. Anschließend folgen die mit Zulegematerial gelaserten Prüfkörper der Serie 9 (469 ± 49 MPa) und Serie 7 (444 ± 32 MPa), deren Standardabweichung mit 32 MPa geringer ist als die der Serien 9 und 10. Die höheren Werte der Zugfestigkeit der Serien 6 und 8, nach Einlagerung in Kunstspeichel, spiegeln sich in der Dehngrenze wieder. Für die gelöteten Probekörper der Serie 3 (193 ± 129 MPa) und Serie 4 (274 ± 165 MPa) liegen deutlicher als im Diagramm der Zugfestigkeitsdarstellung die höchsten Standardabweichungen vor.

In Korrelation zu den Zugfestigkeitswerten und deren Standardabweichungen sind für die durchgeführten Versuche die besten Ergebnisse mit den aus Neumaterial und stumpf gelaserten Prüfkörpern erreicht worden.

4.3 Lichtmikroskopische Untersuchungsergebnisse der Bruchflächen

Die im Zugversuch zerstörten Prüfkörper wurden mit einem Stereoauflichtmikroskop und einer Kaltlichtquelle an der Bruchfläche fotografiert. Dabei wurde für jede bearbeitete Serie der beste, mediane und schlechteste Wert im Zugversuch ausgewählt.

Zum Vergleich liegen die Bruchflächen der Serie 1 und 2 vor.



Abb. 7: Bruchfläche der Probe Serie 1 Neumaterial ungefügt, nicht korrodiert



Abb. 8: Bruchfläche der Probe Serie 2 Altmaterial ungefügt, nicht korrodiert

Die Oberflächen sind homogen, die Durchmesser der Proben verjüngt. Diese Beobachtung ist sowohl für das Neu- als auch Altmaterial zu machen.



Abb. 9: Bruchfläche der Probe 5, bester Wert der Serie 3 Neumaterial gelötet, nicht korrodiert

Es ist deutlich das eingeschossene Lot im Bruchspalt zu erkennen



Abb. 10: Bruchfläche der Probe 4, medianer Wert der Serie 3 Neumaterial gelötet, nicht korrodiert

Hier zieht sich der Bruch durch das Lot, welches sich nicht richtig mit der Metalloberfläche der Probe verbunden hat.

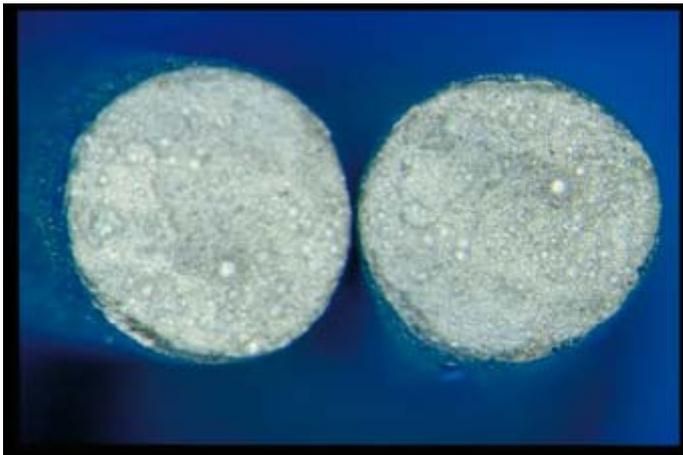


Abb. 11: Bruchfläche der Probe 1, schlechtesten Wert der Serie 3 Neumaterial gelötet, nicht korrodiert

Für den schlechtesten Wert dieser Serie ist der gut zu erkennende lunkerige Lötspalt verantwortlich.



Abb. 12: Bruchfläche der Probe 6, bester Wert der Serie 4 Neumaterial gelötet, korrodiert

An den Rändern des Lötspaltes sind keine Korrosionserscheinungen zu sehen. Die Oberfläche stellt sich im Bruchspalt homogen dar.

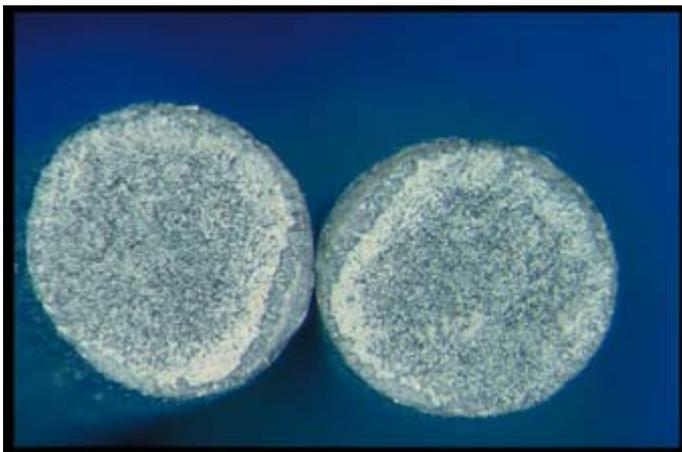


Abb. 13: Bruchfläche der Probe 3, medianer Wert der Serie 4 Neumaterial gelötet, korrodiert

Am Rand der Oberfläche ist der Abriss des Lotes von der Probenoberfläche sichtbar, dass Lot ist nicht vollständig eingeschossen.



Abb. 14: Bruchfläche der Probe 8, schlechtesten Wert der Serie 4 Neumaterial gelötet, korrodiert

Die Oberfläche ist stark von Lunkern durchzogen, es ist sogar noch die vorbereitete Probenoberfläche zu erkennen. Der Lötprozess ist wahrscheinlich zu kalt abgelaufen.

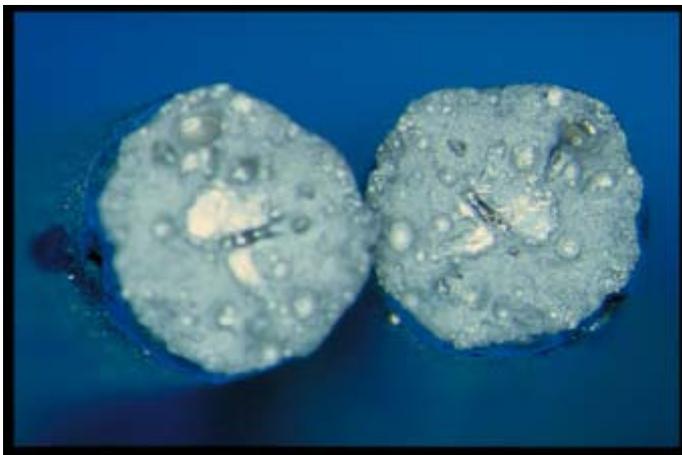


Abb. 15: Bruchfläche der Probe 8, besten Wert der Serie 5 Neumaterial gelasert, nicht korrodiert

Die Bruchoberfläche zeigt Gaslunker in der gesamten Schweißzone, die Mitte der Probe ist nicht vollständig durchgeschweißt worden.

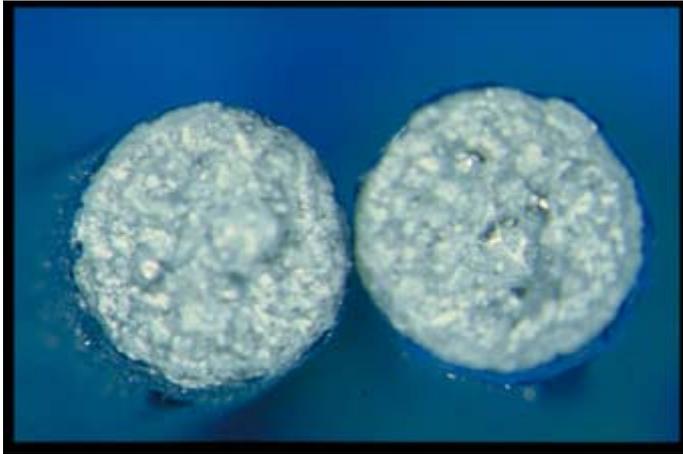


Abb. 16: Bruchfläche der Probe 5, medianer Wert der Serie 5 Neumaterial gelasert, nicht korrodiert

Diese Oberfläche ist homogen und konnte dennoch nicht den höchsten Wert im Zugversuch erzielen.

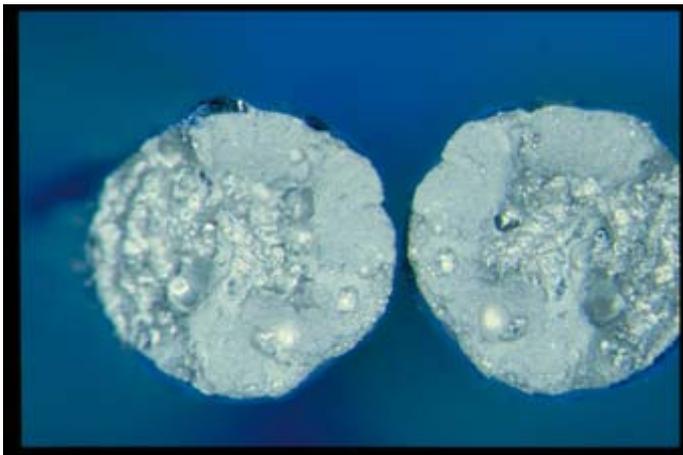


Abb. 17: Bruchfläche der Probe 2, schlechtesten Wert der Serie 5 Neumaterial gelasert, nicht korrodiert

Die Bruchfläche zieht sich sowohl durch die Schweißnaht als auch durch die Wärmeeinflusszone des Ausgangsmaterials, dies stellt jedoch die Schwachstelle der Schweißnaht dar. Es konnte nur eine Zugfestigkeit von 458,9 MPa erreicht werden.



Abb. 18: Bruchfläche der Probe 6, bester Wert der Serie 6 Neumaterial gelasert stumpf, korrodiert

Die Probe ist nicht vollständig durchschweißt; dies ist deutlich in der Mitte am Schliff, der der Vorbereitung diente, zu erkennen. Des weiteren zeigt die Probe eine homogene Gefügestruktur.

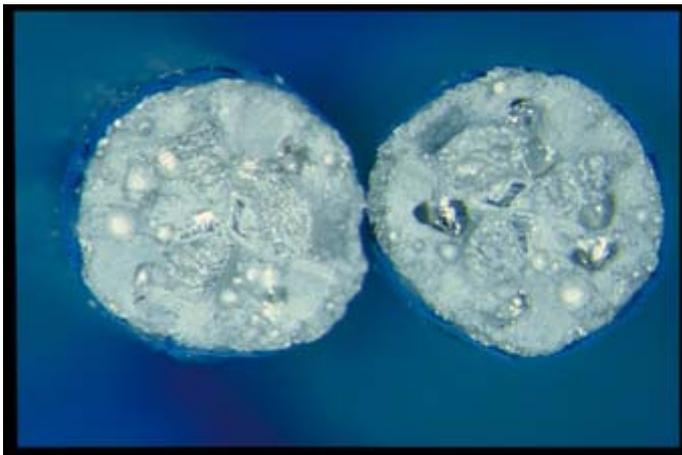


Abb. 19: Bruchfläche der Probe 4, medianer Wert der Serie 6 Neumaterial gelasert stumpf, korrodiert

Auch diese Probe ist nicht vollständig durchschweißt, zeigt zusätzlich aber viele Gaslunker im Gefüge.



Abb. 20: Bruchfläche der Probe 1, schlechtesten Wert der Serie 6 Neumaterial gelasert stumpf, korrodiert

Die Oberfläche ist mit nur einem sichtbaren Lunker relativ homogen. Die Zugfestigkeit von nur 590 MPa ist in dieser Serie der niedrigste Wert, in Bezug auf die Serien 5, 7 und 8, die gleichartig behandelt wurden, jedoch gut.

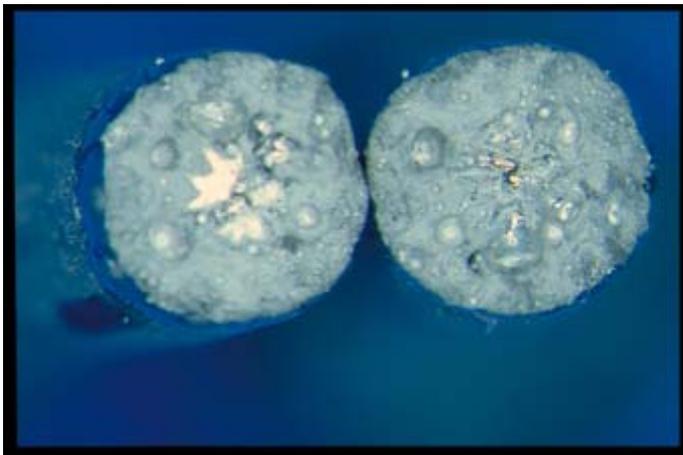


Abb. 21: Bruchfläche der Probe 7, besten Wert der Serie 7 Altmaterial gelasert stumpf, nicht korrodiert

Die Probe aus 5-mal vergossenem BegoPal[®] 300 ist nicht vollständig durchgeschweißt und zeigt eine ebenso hohe Anzahl an Gaslunkern wie im Neumaterial.

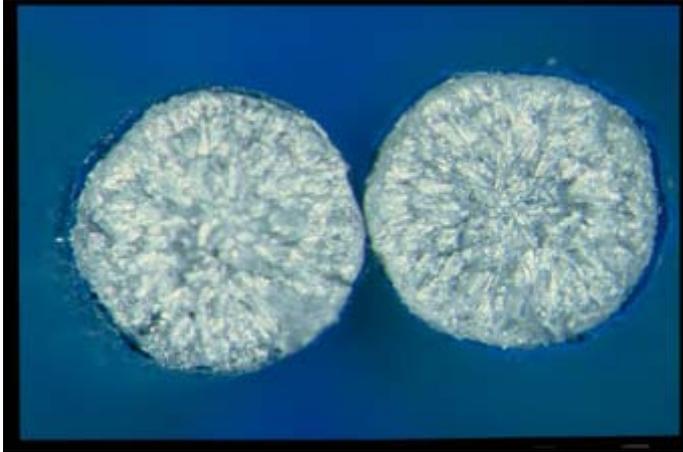


Abb. 22: Bruchfläche der Probe 1, medianer Wert der Serie 7 Altmaterial gelasert stumpf, nicht korrodiert

Die Oberfläche stellt sich homogen dar, ist komplett durchschweißt und scheint genau in der Schweißnaht zerrissen zu sein.

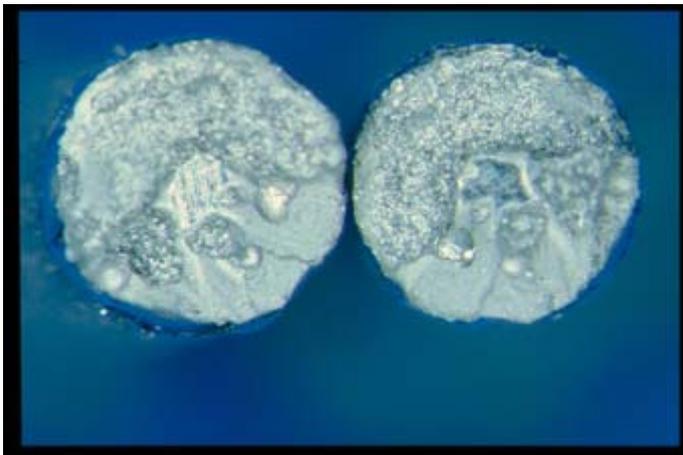


Abb. 23: Bruchfläche der Probe 6, schlechtester Wert der Serie 7 Altmaterial gelasert stumpf, nicht korrodiert

Diese Probe ist nicht vollständig durchschweißt. Teilweise ist sie in der Lasernaht und auch in der Wärmeeinflusszone gerissen.



Abb. 24: Bruchfläche der Probe 7, bester Wert der Serie 8 Altmaterial gelasert stumpf, korrodiert

Es ist eine relativ breite nicht durchschweißte Zone in der Probe zu erkennen, mit großen Gaslunkern in der Mitte der Probe und kleineren Lunkern. Dies ist wahrscheinlich durch Verdampfen von Legierungsbestandteilen entstanden.

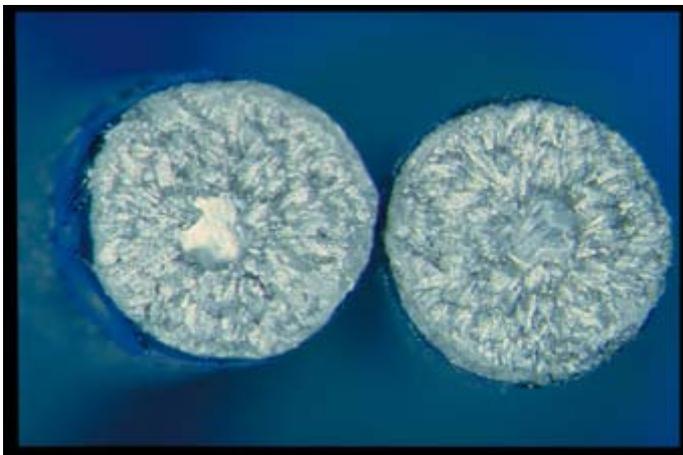


Abb. 25: Bruchfläche der Probe 4, medianer Wert der Serie 8 Altmaterial gelasert stumpf, korrodiert

Die Probenoberfläche stellt sich wie Probe 7/1 dar.

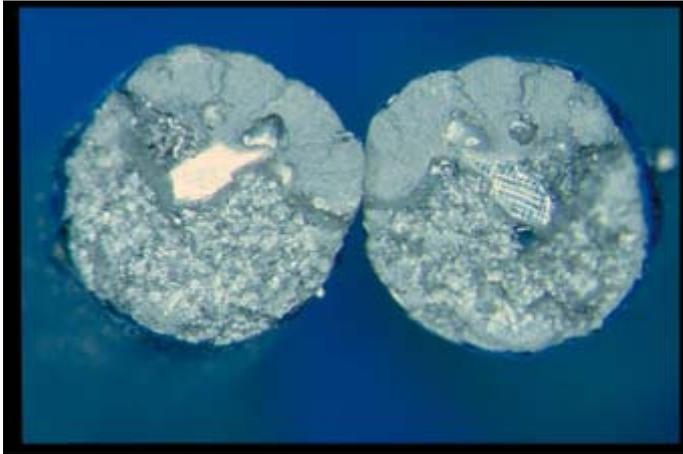


Abb. 26: Bruchfläche der Probe 1, schlechtesten Wert der Serie 8 Altmaterial gelasert stumpf, korrodiert

Die Probe ist nicht vollständig durchgeschweißt und teilweise in der Naht sowie im Ausgangsgefüge bzw. in der Wärmeeinflusszone gerissen.

Die folgenden Probekörper sind mit Zulegematerial geschweißt.



Abb. 27: Bruchfläche der Probe 1, besten Wert der Serie 9 Neumaterial gelasert mit Zulegematerial, nicht korrodiert

Es können Wirbelungen sowie Gaslunker in der Oberfläche gefunden werden. Es ist kein schräger Riss durch die Lasernaht festzustellen, wie es teilweise an den stumpf gelaserten zu sehen ist.



Abb. 28: Bruchfläche der Probe 5, medianer Wert der Serie 9 Neumaterial gelasert mit Zulegematerial, nicht korrodiert

Es sind wieder Gaslunker zu finden.

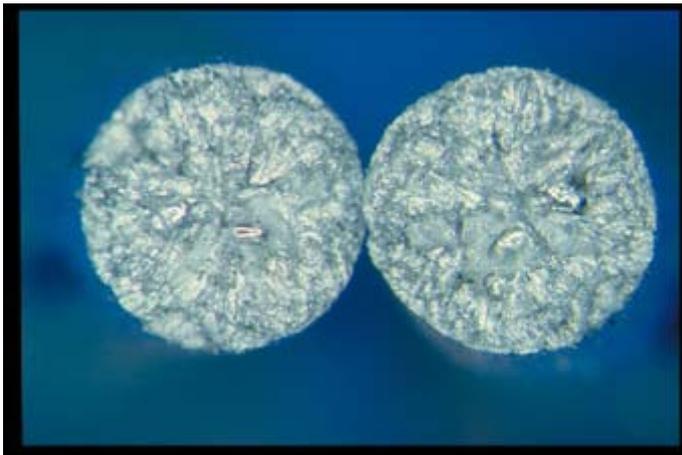


Abb. 29: Bruchfläche der Probe 4, schlechtester Wert der Serie 9 Neumaterial gelasert mit Zulegematerial, nicht korrodiert

Mit 474,8 MPa erreicht diese Probe nur eine Zugfestigkeit die zu vergleichen ist mit Werten aus den gelöteten Serien und auch den stumpf gelaserten Serien. Die Oberfläche stellt sich wie Probe 7/1 (445,7 MPa) und 8/4 (498,8 MPa) dar, ohne Lunker und homogen. Eine Korrelation zwischen Alt- und Neumaterial in Bezug auf diese Werte kann nicht gefunden werden.



Abb. 30: Bruchfläche der Probe 7, bester Wert der Serie 10 Neumaterial gelasert mit Zulegematerial, korrodiert

Die Bruchfläche ist durchsetzt von Gaslunkern und es sind keine Korrosionserscheinungen zu sehen.

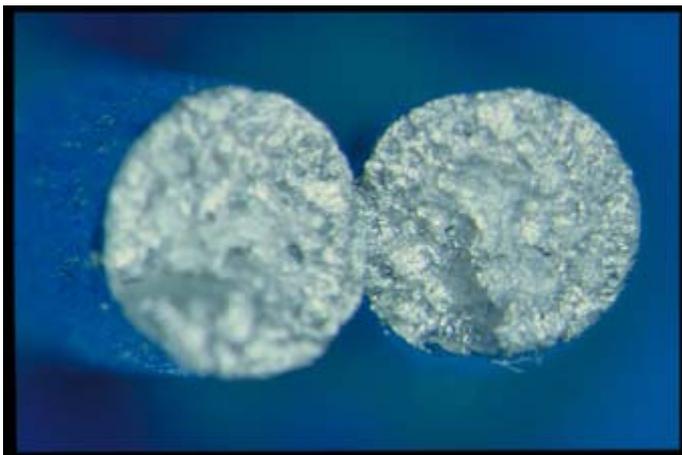


Abb. 31: Bruchfläche der Probe 5, medianer Wert der Serie 10 Neumaterial gelasert mit Zulegematerial, korrodiert

Es sind keine Gaslunker zu erkennen, die Bruchfläche stellt sich homogen dar.

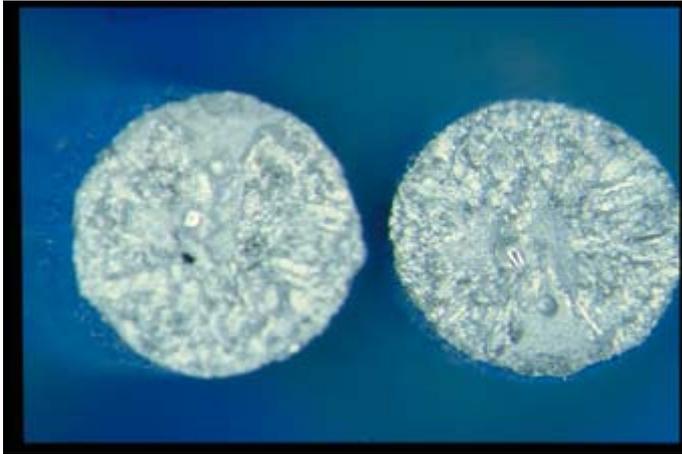


Abb. 32: Bruchfläche der Probe 4, schlechtesten Wert der Serie 10 Neumaterial gelasert mit Zulegematerial, korrodiert

In Bezug auf die Oberfläche ist eine deutliche Ähnlichkeit zu den Proben 9/4 und den weiter genannten Proben 7/1 und 8/4 zu sehen. Die Gaslunker scheinen keine negativen Auswirkungen auf die Zugfestigkeit zu haben.

4.4 Rasterelektronische Aufnahmen mit den Messpunkten

Die Rasterelektronischen Aufnahmen zeigen jeweils den Vickershärteeindruck und die Messpunkte für die EDX-Analyse. Da für die Durchführung der EDX-Analyse die Oberflächen nicht geätzt wurden, sind nur Aussagen über das Vorhandensein von Lunkern oder Ablagerungen nach der Einlagerung in das Korrosionsmedium zu machen.

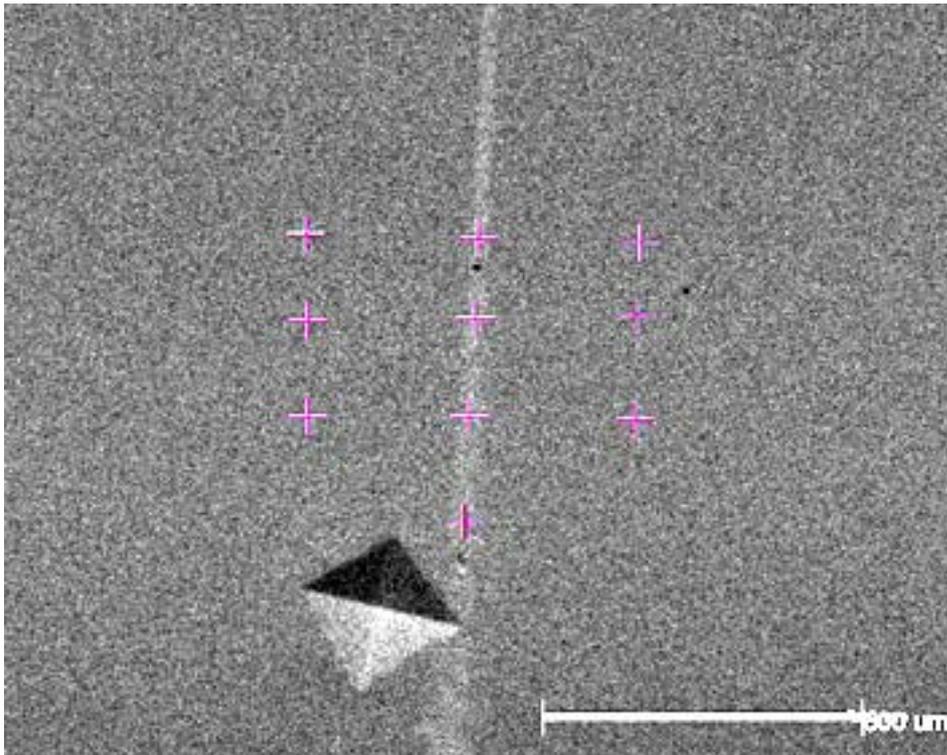


Abb. 33: Serie 3 Neumaterial, gelötet, nicht korrodiert

Es sind der Vickershärteeindruck und die Messpunkte der Serie 3 zu erkennen. Die mittlere Reihe der Messpunkte liegt genau auf der Lotnaht.

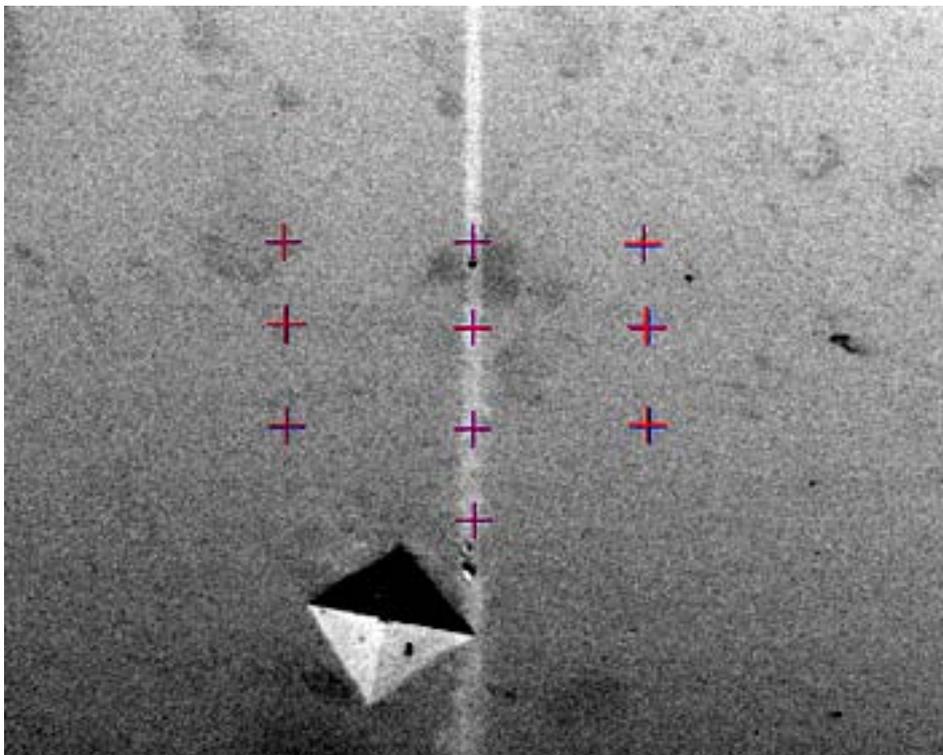


Abb. 34: Serie 4 Neumaterial, gelötet, korrodiert

Es sind der Vickershärteeindruck und die Messpunkte der Serie 4 zu erkennen. Die mittlere Reihe der Messpunkte liegt genau auf der Lotnaht, die sich in dieser Aufnahme deutlich heller darstellt. Es sind Lunker an Messpunkt 2 und 10 zu erkennen.

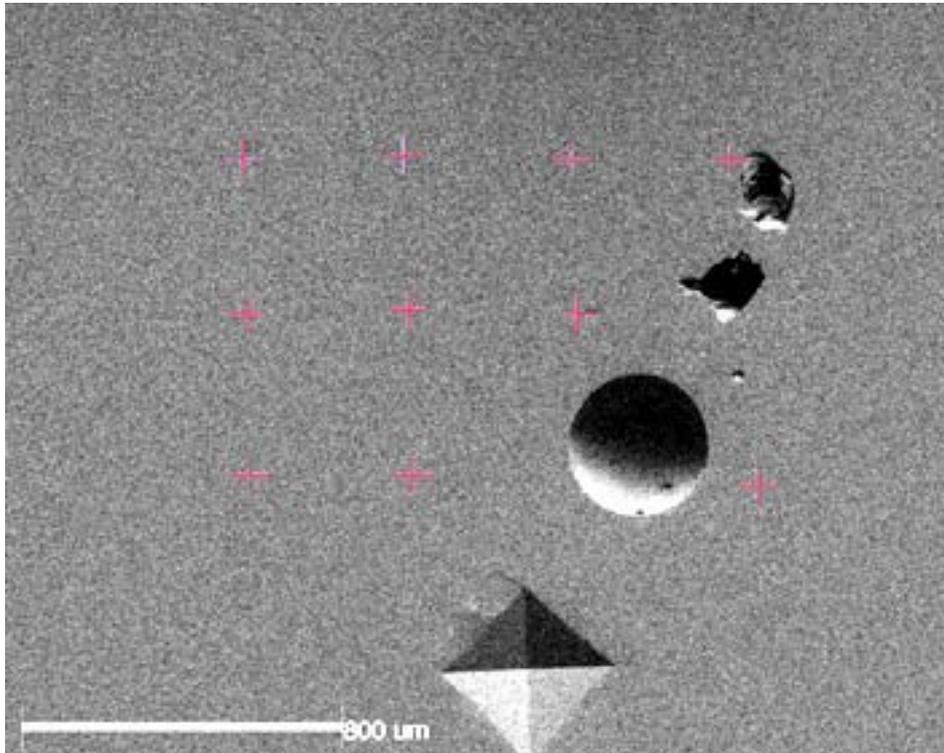


Abb. 35: Serie 7 Altmaterial, gelasert stumpf, nicht korrodiert

Es sind der Vickershärteeindruck und die Messpunkte der Serie 7 zu erkennen. Oberhalb des Eindruckes sind deutlich Lunker zu erkennen, die in der Schweißnaht liegen.

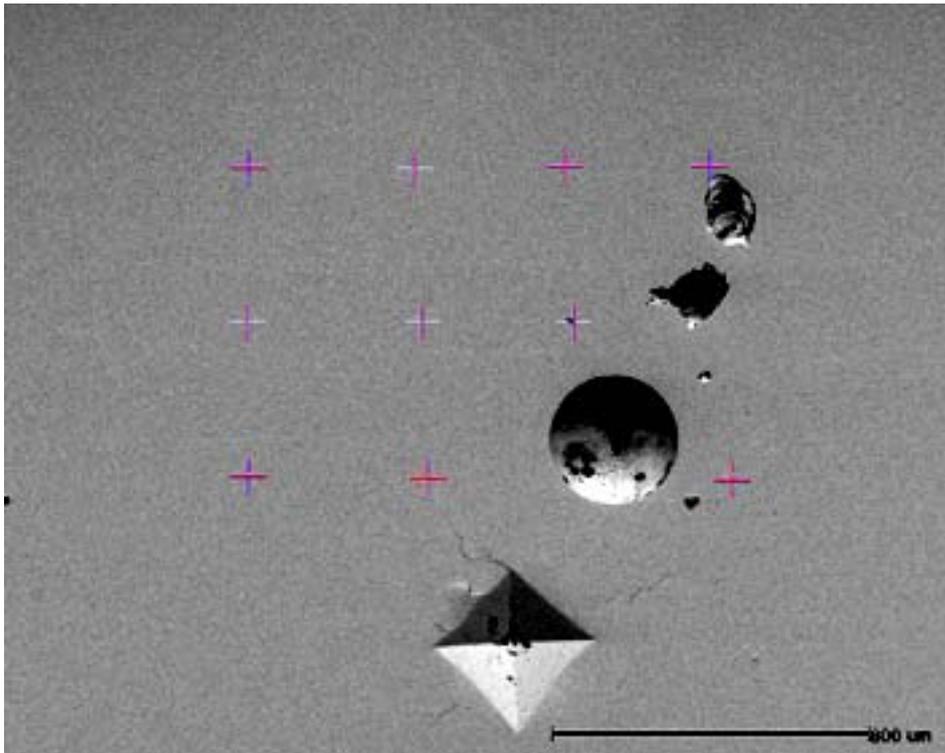


Abb. 36: Serie 8 Altmaterial, gelasert stumpf, korrodiert

Es sind der Vickershärteeindruck und die Messpunkte der Serie 8 zu erkennen. In den Lunkern und an der Spitze des Vickerseindrucks sind Ablagerungen sichtbar. Eine Messung in einem Lunker ergaben Silizium zu 96 %.

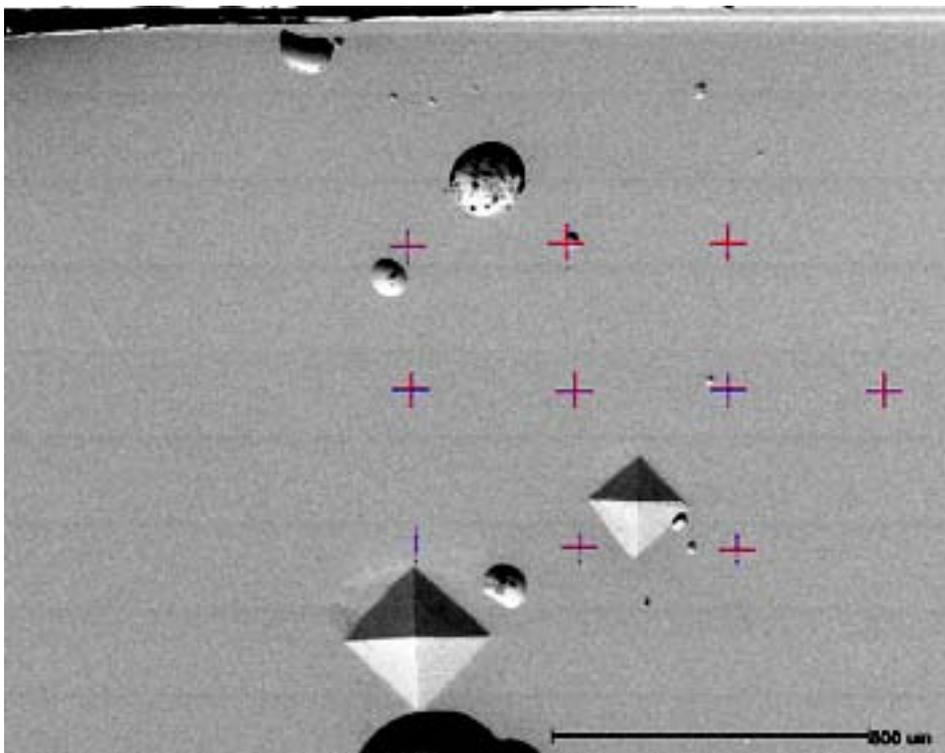


Abb. 37: Serie 9 Neumaterial, gelasert mit Zulegematerial, nicht korrodiert

Es sind der Vickershärteeindruck und die Messpunkte der Serie 9 zu erkennen. Hier treten innerhalb der Schweißzone von allen betrachteten Serien die häufigsten Lunker auf.

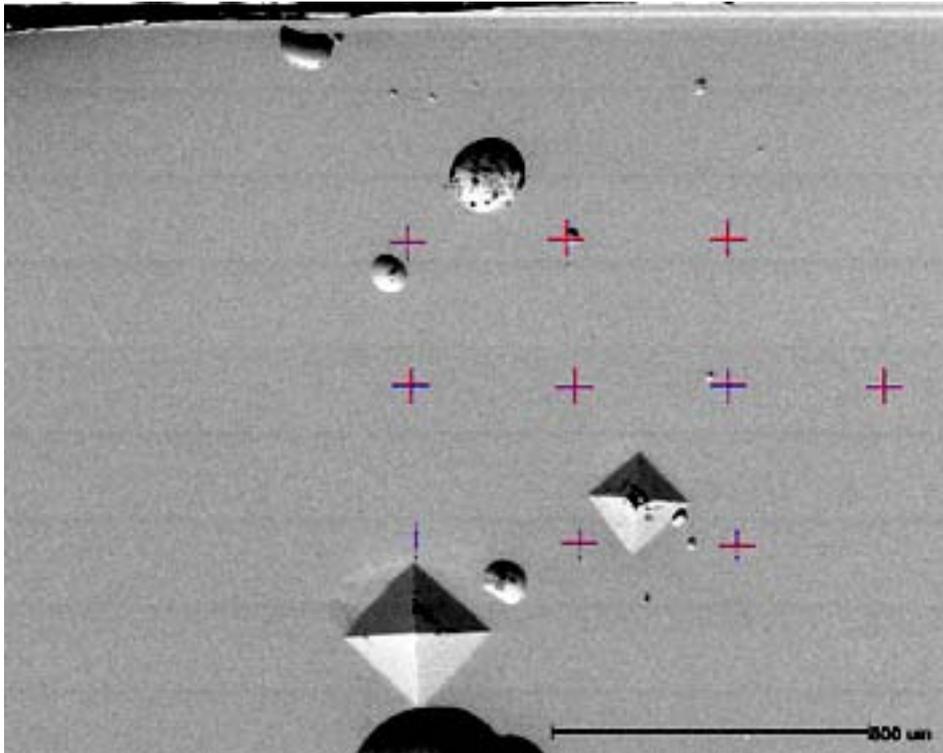


Abb. 38: Serie 10 Neumaterial, gelasert mit Zulegematerial, korrodiert

Es sind der Vickershärteeindruck und die Messpunkte der Serie 10 zu erkennen. In den Lunkern und auf den Spitzen der Eindrücke sind Ablagerungen nach der sechsmonatigen Einlagerungszeit sichtbar.

Auf die Abbildung der Serie 5 und 6 wurde verzichtet; hier waren innerhalb der Schweißzone keine Lunker festzustellen.

4.5 Ergebnisse der EDX-Analyse

Es folgt die graphische Darstellung der Ergebnisse aus den Messpunkten.

Zum Vergleich sind noch mal die Bestandteile von BegoPal[®] 300 (Abb. 39) sowie die Bestandteile des verwendeten Lotes (Abb. 40) aufgeführt.

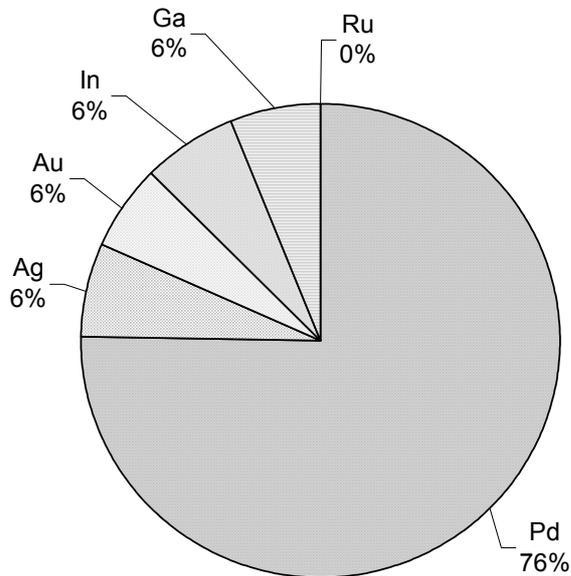


Abb. 39: Zusammensetzung BegoPal[®] 300 (Masse-%)

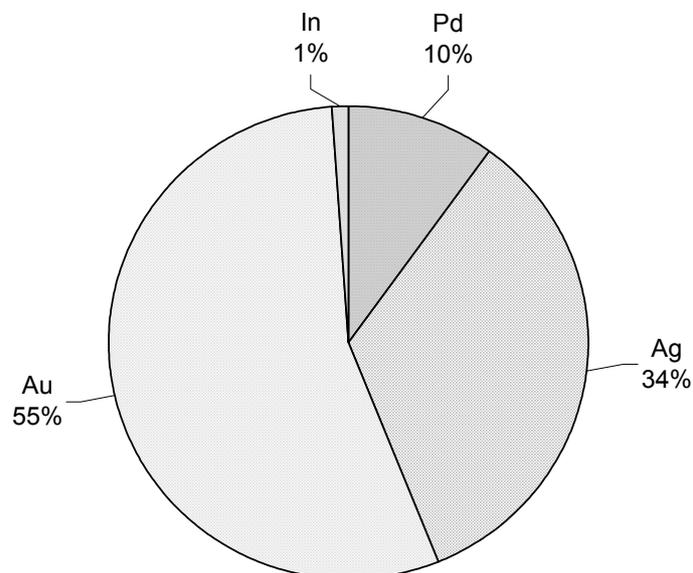


Abb. 40: Begostar-Lot

Um die Abweichung der EDX-Analyse von den Herstellerangaben zu verdeutlichen, wurde eine Messung auf unverarbeiteter Lotoberfläche durchgeführt.

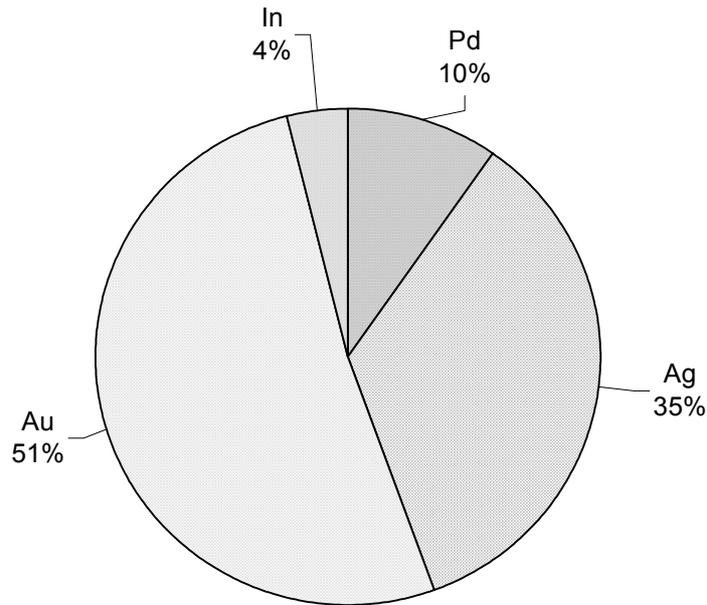


Abb. 41: Unverarbeitete Oberfläche des Lotes BegoPal® 300

Indium ist nach quantitativer Analyse um 3 % erhöht, Gold um 4 % erniedrigt, Palladium entspricht den Herstellerangaben, Silber weicht nur um 1 % ab.

Schon an Serie 1, die ungefügt blieb, ist im Mittelwert eine deutliche Abweichung der Herstellerangaben von 10 % im Ausgangswert des Palladium festzustellen. Der Anteil an Silber ist dafür um 10 % erhöht. Gallium stellt sich um 2 % erniedrigt dar, Gold um 1% erniedrigt. Ruthenium ist sogar um das 40-fache erhöht.

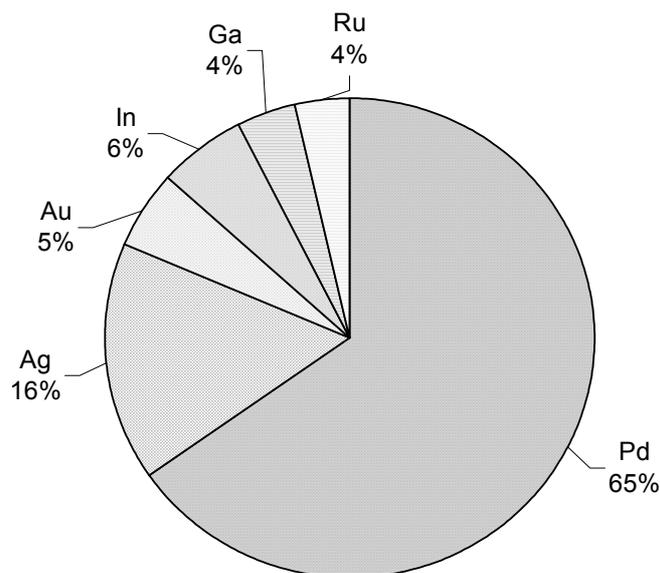


Abb. 42: Serie 1 Neumaterial nicht korrodiert / Mittelwert

Der Vergleich mit der ungefügten Serie 2 aus Altmaterial stellt prozentual eine ähnliche Elementverteilung dar. Es liegen nur 1 %ige Abweichungen vor. Der Oxidbildner Indium ist erniedrigt, während Gallium erhöht ist. Ruthenium ist dagegen wiederum erniedrigt.

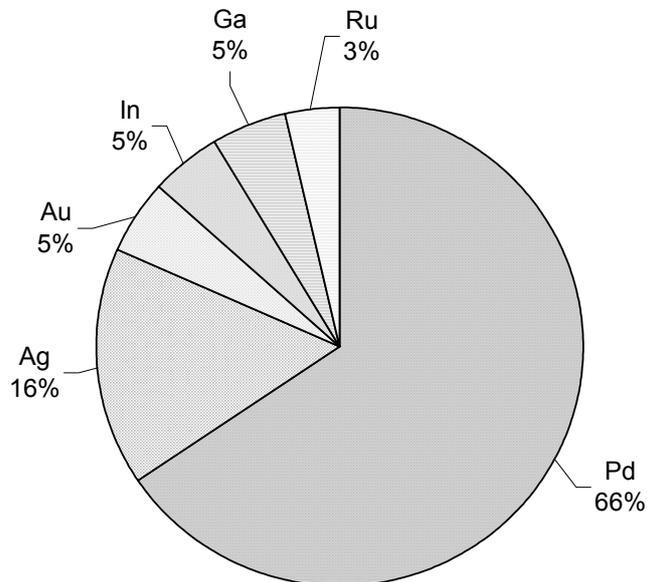


Abb. 43: Serie 2 Altmaterial nicht korrodiert / Mittelwert

Die Elementverteilung der gelöteten Serie 3 zeigt deutliche Unterschiede zu den ungefügten Prüfkörpern. Dieses Ergebnis ist nicht unerwartet, da durch das Hinzufügen des Lotes die Zusammensetzung der Lotnaht verändert wird. Das Kreisdiagramm zeigt in Abb. 44 die Verteilung der Elemente über die gesamten 10 Messpunkte in der EDX-Analyse und in Abb. 45 nur die Elementverteilung der Lotmesspunkte 2, 5, 8 und 10 direkt in der Lotnaht.

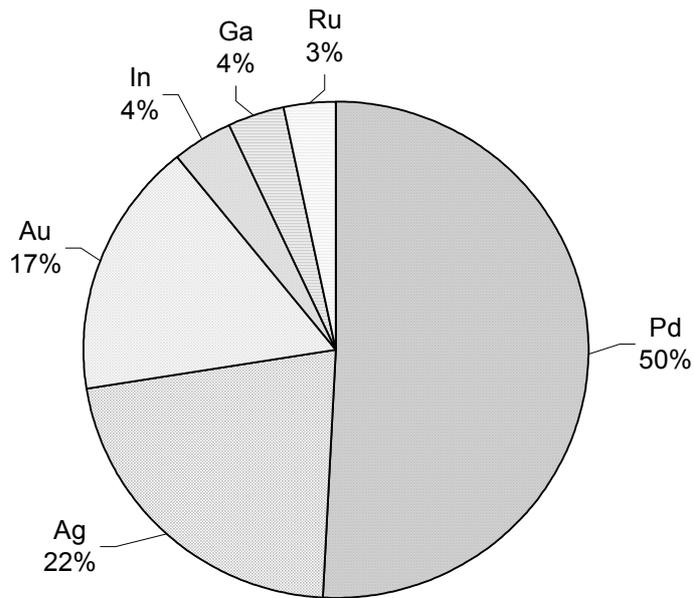


Abb. 44: Serie 3 Neumaterial gelötet nicht korrodiert / Mittelwert

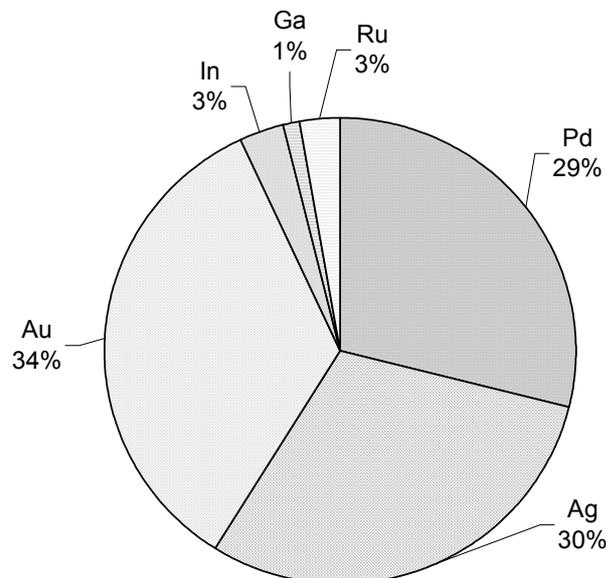


Abb. 45: Serie 3 nur die Lotmesspunkte / Mittelwert

Aufgrund des hohen Gold- und Silbergehaltes im Lot sind diese Metalle deutlich erhöht und Palladium zugunsten dieser Metalle reduziert. Im Abb. 44 sind Gallium, Indium und Ruthenium gegenüber den Werten der Messpunkte der Serie 1 und 2 erniedrigt. In Abb. 45 ist Gallium mit nur noch einem Prozent enthalten, Ruthenium- und Indiumgehalte sind weiter verringert.

Serie 4, die für den Zeitraum von 6 Monaten in Korrosionslösung eingelagert wurde, zeigt folgende Elementverteilung.

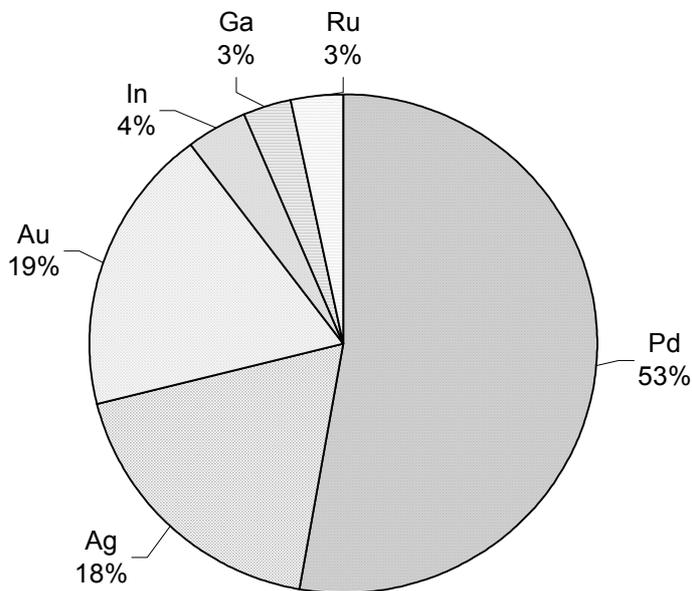


Abb. 46: Serie 4 Neumaterial gelötet korrodiert / Mittelwert

Nur Gallium ist um 1 % in der Gesamtanalyse erniedrigt, Gold und Palladium unwesentlich erhöht.

Im Vergleich der Messpunkte von Serie 3 zu Serie 4 ist in der Lotnaht Indium um 1 % erniedrigt. Gallium und Ruthenium sind nicht verändert Palladium, Silber und Gold sogar erhöht.

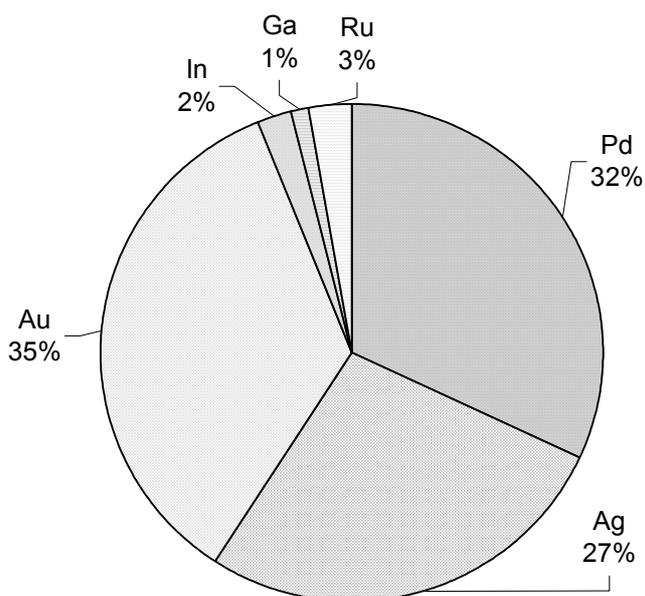


Abb. 47: Serie 4 nur die Lotmesspunkte / Mittelwert

Die Serien 5 und 6 weisen in ihrer Zusammensetzung keine erheblichen Unterschiede auf. Da ohne Zulegematerial nur Stoß auf Stoß gelasert wurde ist im Gegensatz zu den gelöteten Prüfkörpern hier keine stärkere Schwankung in der Elementverteilung gegenüber den ungefügten Prüfkörpern zu erwarten. Die Aussagen des Hersteller über die Zusammensetzung werden jedoch nicht erreicht.

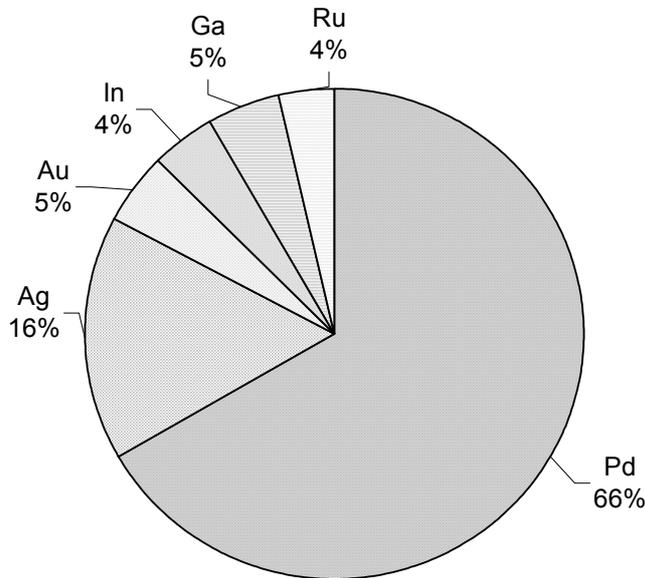


Abb. 48: Serie 5 Neumaterial stumpf gelasert nicht korrodiert

Indium ist in Serie 6, nach der Einlagerung in Korrosionslösung im Vergleich zur Serie 7 erhöht, Gallium, Ruthenium und Gold haben sich prozentual gar nicht verändert, und Silber ist in Serie 6 um 5 % erniedrigt, dafür Palladium erhöht.

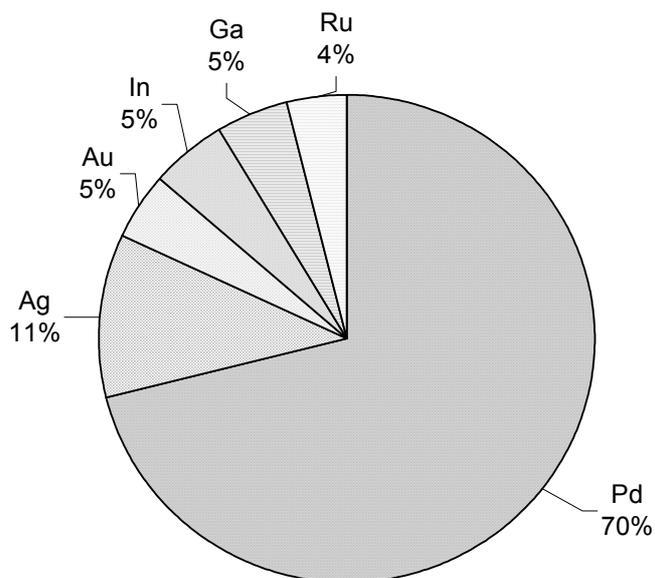


Abb. 49: Serie 6 Neumaterial stumpf gelasert korrodiert / Mittelwert

Für die gleichartig verarbeiteten Serien 7 und 8 aus Altmaterial sind folgende Kreisdiagramme aussagekräftig.

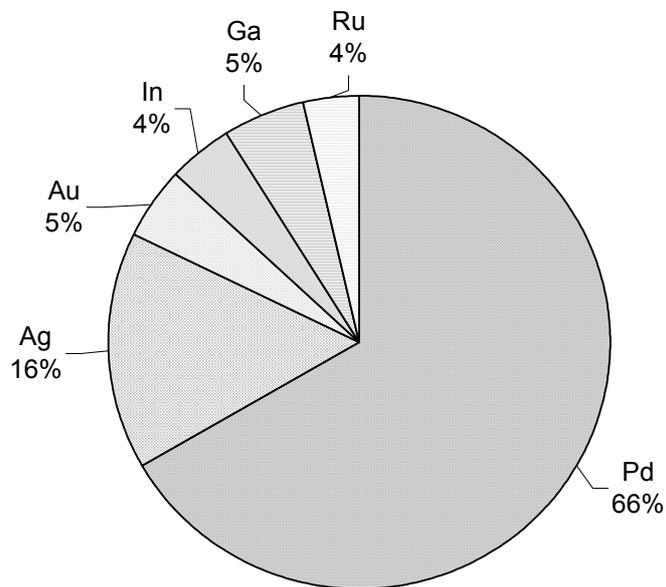


Abb. 50: Serie 7 Altmaterial stumpf gelasert nicht korrodiert / Mittelwert

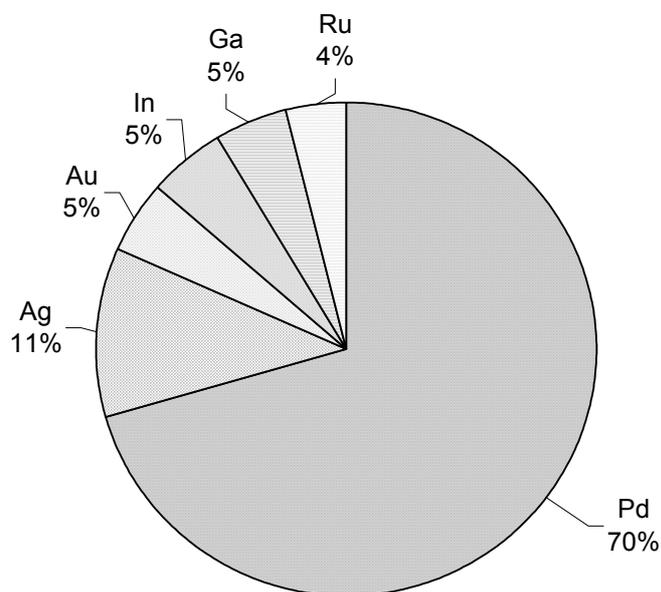


Abb. 51: Serie 8 Altmaterial stumpf gelasert korrodiert / Mittelwert

In der Zusammensetzung entspricht Serie 7 der Elementverteilung von Serie 5, die aus Neumetall besteht. Für Serie 6 liegen im Vergleich zu Serie 8 ebenfalls genau die gleichen quantitativen Verhältnisse vor. Nach der Einlagerung in das Korrosionsmedium ist keine Abnahme des Gehaltes von Indium festzustellen,

sondern eine 1 %ige Zunahme. Gallium, Ruthenium und Gold weisen keine Umverteilung auf. Palladium ist messbedingt zulasten des Silbergehaltes in Serie 8 um 4 % erhöht.

Die Analyse der mit Zulegematerial gelaserten Prüfkörper ergab, dass im Vergleich der Zusammensetzung vor und nach der Einlagerung bei Indium, Gallium und Ruthenium keine quantitative Änderung zu finden ist, die Abweichung der Bestandteile von Silber und Palladium sind nicht erheblicher als die der anderen Serien bzw. der ungefügten Serien 1 und 2. In Relation zur Stoß auf Stoß gelaserten Serie 5 und 6 ist neben den veränderten Werten von Silber und Palladium nur eine 1 %ige Erniedrigung des Gehaltes an Indium in Serie 5 im Gegensatz zu Serie 6, 9 und 10 zu finden.

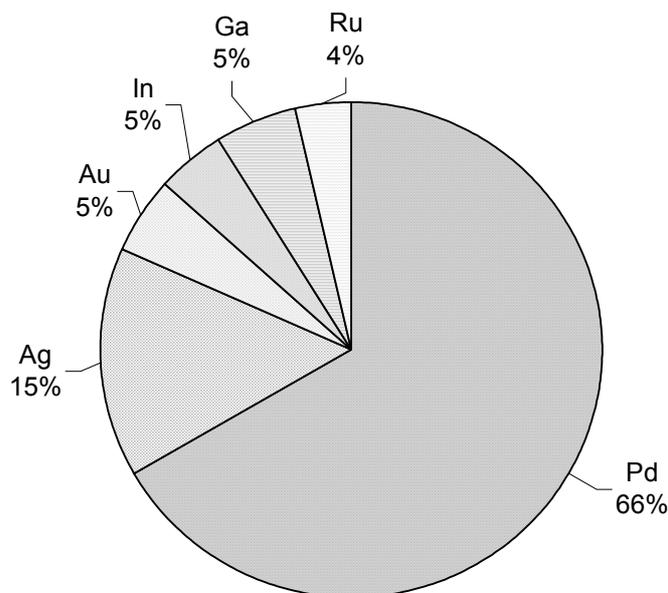


Abb. 52: Serie 9 Neumaterial gelasert mit Zulegematerial nicht korrodiert / Mittelwert

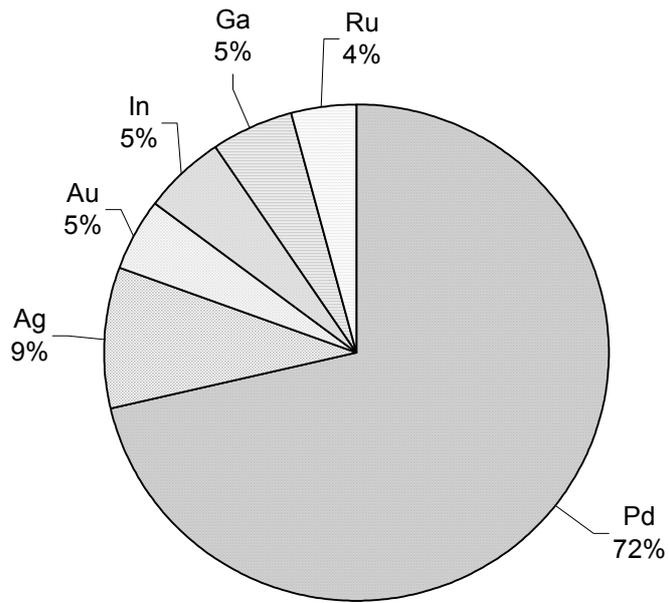


Abb. 53: Serie 10 Neumaterial gelasert mit Zulegematerial korrodiert / Mittelwert