

**Untersuchung der Schweißbeignung
von AlMgSi1-Blechen im Hinblick auf
EUROCODE 9**

T 2965

T 2965

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2001, ISBN 3-8167-5988-2

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

e-mail info@irb.fhg.de

URL <http://www.IRBbuch.de>

Abschlussbericht

Forschungsvorhaben von der DIBt, Projekt P 32 5 16.91.31-872/97
BAM-Vorhaben: V.53 – 17/98

Thema: **Untersuchung der Schweißbeignung von AlMgSi1-Blechen
im Hinblick auf EUROCODE 9**

Forschungsstelle: Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM)
Fachgruppe V.5 „Sicherheit in der Fügetechnik“
Unter den Eichen 87
12205 Berlin

Sachbearbeiter: Dr.-Ing. H. Krafka

Leiter der Forschungsstelle: Dr.-Ing. Th. Böllinghaus

Berichtszeitraum: 2000/2001

Inhaltsverzeichnis

Seite

<u>1</u>	<i>Einleitung</i>	3
2	<i>Problemstellung/Forschungsziel</i>	3
2.1	Metallkundliche Grundlagen	3
3	<i>Untersuchungsprogramm</i>	4
3.1	Chemische Analyse der Versuchswerkstoffe	4
3.2	Probenformen und Probenherstellung	5
3.21	Schweißen der Schweißprobe (Coupon) für Kreuzzugprobe nach dem MIG-Verfahren	
3.22	Metallographische Untersuchung der Kehlnähte und des Grundwerkstoffes	5
3.3	Zugversuch an Rundzugprobe und an Flachzugprobe	6
3.4	Kerbschlagbiegeversuche	6
3.5	Zugversuche an Kreuzzugprobe nach Entwurf DIN 4113 Teil 2 Anhang A	7
3.6	Heißrissuntersuchung nach dem „Modifizierten Vareststraint-Transvareststraint- Verfahren (MVT)“	7
4	<i>Ergebnisse und Diskussionen</i>	8
4.1	Vergleich der chemischen Zusammensetzung der untersuchten Bleche	8
4.2	Vergleich der Festigkeitskennwerte aus Zugversuch mit denen aus Tabelle	
4.3	Vergleich der Kerbschlagarbeiten der untersuchten Bereiche	8
4.4	Vergleich der maximalen Zugspannung von Kreuzzugproben	9
4.5	Ergebnisse der MVT-Versuche	9
4.6	Ergebnisse der metallographischen Untersuchung	9
4.61	Härtewerte	9
4.62	Gefüge	9
4.63	Bruchflächenerscheinungen	10
4.64	Heißrisse in MVT- Proben	10
5.	<i>Zusammenfassung und Schlussbemerkung</i>	10
6.	<i>Literaturhinweise</i>	10
7	<i>Tabellen 1 bis 7 und Abbildungen 1 bis 18</i>	11-34

1. Einleitung

Die Sicherheit von geschweißten Bauteilen aus Al- Legierungen ist von vielen Einflußgrößen, vor allem von der Anzahl und Größe der Schweißimperfectionen abhängig. Häufig auftretende Schweißfehler sind Heißrisse, die werkstoff-, konstruktions- und schweißverfahrensbedingt (herstellungsbedingt) sein können: sie bestimmen die Heißrissempfindlichkeit des verwendeten Werkstoffs. Die Einflußgrößen auf die Heißrissempfindlichkeit von Werkstoffen lassen sich nicht quantifizieren, weil das Zusammenwirken der thermomechanischen Prozesse beim Schweißen vielfältig ist und Al- Legierungen unterschiedlich auf die verschiedenen Einflüsse reagieren.

Unterschiede in der Heißrissempfindlichkeit von (aushärtbaren) Al-Knetlegierungen werden vom Gehalt an Legierungselementen, vom angewendeten Schweißverfahren bzw. von der eingestellten Streckenenergie und von der Höhe der eingebrachten Verformung (Schrumpfung) während des Schweißens verursacht. Als metallurgische Ursachen der Heißrissempfindlichkeit von Aluminium-Mehrstofflegierungen werden das große Temperatur- und Zeitintervall der Erstarrung und das kubischflächenzentrierte Raumgitter angesehen. Kubischflächenzentrierte Metalle (Atomgitter) haben bei hohen Temperaturen, auch in der Nähe des Schmelzpunktes (Rissbildungstemperatur), ein geringeres Lösungsvermögen an Legierungs- und Begleitelementen als kubischraumzentrierte Metalle. Ferner ist die Diffusionsgeschwindigkeit der Legierungselemente ebenfalls geringer im Vergleich zu der in kubischraumzentrierten Metallen. Beides, die geringere Löslichkeit und geringere Diffusionsgeschwindigkeit im kubischflächenzentrierten Aluminium begünstigen die Seigerung der heißrissverursachenden nicht in Lösung gegangener Elemente und die Bildung niedrigschmelzender (z.T. auch eutektischer) Phasen. Diese bilden bei der Erstarrung der Schweißschmelze die Korn- und Dendritengrenzen, entlang derer Erstarrungsrisse (ER) und die Wiederaufschmelzrisse (WAR) in der Wärmeeinflusszone (WEZ) entstehen können /1,2 /.

2 Problemstellung/Forschungsziel

Bei der Erteilung des Schweißbeurteilungsnachweises für Betriebe zum „Schweißen von tragenden Al-Bauteilen“ hat sich in einigen Fällen gezeigt, dass der Kreuzstoß aus AlMgSi1-Bleichen aufgrund von Heißrisen, Poren und Entfestigung, nicht die erwartete erforderliche Festigkeit aufwies. Dies wird als Sicherheitsrisiko angesehen, weil sich die geringere Festigkeit der Bauteile unter Betriebsbedingungen Lebensdauer vermindern kann.

Ziel der Untersuchung ist es, zu klären, ob die Heißrissicherheit von AlMgSi1-Schweißverbindungen von der Charge, und somit vom Hersteller abhängig und ob sie im Hinblick auf EUROCODE 9 gewährleistet ist. Des weiteren soll geklärt werden, ob es einen Zusammenhang zwischen den mechanisch- technologischen Werten, den chemischen Analysewerten und der Heißrissempfindlichkeit gibt.

2.1 Metallkundliche Grundlagen

AlMgSi-Knetlegierungen gehören zu den warm- und kalt aushärtbaren Al-Legierungen. Ihre Schweißbeurteilung, Festigkeit und Zähigkeit ist von der chemischen Zusammensetzung, d. h. vom Gehalt der beteiligten Elemente und vom Werkstoffzustand abhängig. Der Werkstoffzustand, die Kalt- und Warmaushärtbarkeit beruht auf intermetallischen Phasen, z.B. Mg₂Si, die aus der übersättigten Matrix (Mischkristall) schon bei Raumtemperatur (Kaltauahärtung) ausgeschieden werden. Einschränkungen in der Schweißbarkeit ergeben sich durch bestimmte Legierungselemente und -gehalte sowie durch Legierungsphasen, die durch das Schweißen unerwünschte (verminderte) mechanische und technologische Eigenschaften verursachen. Eine von den unerwünschten technologischen Eigenschaften von Al- Legierungen ist die Heißrissigkeit in Schweißungen. Diese Heißrissigkeit ist um so kritischer, je breiter das Erstarrungsintervall einer Legierung ist /3/. In Abb. 1 ist dieser Zusammenhang in einem Schnitt durch das Dreistoffsystem Al-Mg-Si bei einem konstantem Si-Gehalt von 1% (vergleichbar mit dem Versuchswerkstoff) dargestellt. Das Erstarrungszeitintervall und das Er-

starrungstemperaturintervall können bei Schweißgütern durch geeignete Zusatzwerkstoffe verkürzt bzw. erniedrigt werden. Es ist bekannt, dass Zusatzwerkstoffe, die ein ausreichendes Eutektikum bilden können, die Heißrissempfindlichkeit in Schweißungen verringern /4/. Die chemische Zusammensetzung der aushärtbaren AlMgSi-Legierungen als Konstruktionswerkstoffe liegt im Bereich von 0,3 bis 1,5% Mg, 0,2 bis 1,6 % Si, 0 bis zu 1% Mn und 0 bis zu 0,35% Cr plus andere im ppm-Bereich liegenden Elemente /6/, s. Tab. 1. Um eine hohe Festigkeit zu erzielen, liegen die meisten aushärtbaren AlMgSi-Legierungen in ihrer chemischen Zusammensetzung im kritischen Bereich der Heißrissempfindlichkeit. Der kritische Bereich, s. Abb. 2, liegt bei ca. 0,8% Si und bei ca. 1,3% Mg /4, 5, 7/. Deshalb werden, nach Eurocode 9, diese aushärtbaren AlMgSi-Legierungen mit höher legierten, nicht aushärtbaren Zusatzwerkstoffen, die z.B. mit S-AlSi5, die ca. 5% Si oder 5%Mg enthalten, geschweißt. Um heißrisssarme Schweißverbindungen herstellen zu können, sollte der Si-Gehalt in Schweißzusatzwerkstoffen bei mindestens 2% und der entsprechende Wert für Mg bei 3,5% liegen /5, DVS-Richtlinie 0933/, Abb. 2.

Neben den werkstoffbedingten Einflüssen auf die Heißrissempfindlichkeit sind noch die herstellungsbedingten Einflüsse, wie z.B. die Vorwärmtemperatur, die Streckenenergie, Gasreinheit und Gaszusammensetzung, das Schweißverfahren und die Schrumpfung, die hohe Eigenspannungen verursachen, zu beachten. Die Höhe der durch Schrumpfung (Formänderungsbehinderung) induzierten Eigenspannung ist von der Steifigkeit (Form) des Bauteils und von der Warmstreckgrenze des Werkstoffes abhängig.

3 Untersuchungsprogramm

An 10 mm dicken AlMgSi1-Blechen, die von unterschiedlichen Herstellern geliefert bzw. aus unterschiedlichen Chargen entnommen worden sind, soll die Heißrisssicherheit durch Ergebnisse verschiedener Untersuchungsmethoden bewertet werden. Dazu sollen u. a.: Kreuzzugproben, die mit unterschiedlichen Streckenenergien geschweißt werden, MVT- Proben, die mit unterschiedlichen Biegedehnungen zu verformen und mit zwei unterschiedlichen Streckenenergien zu schweißen sind, geprüft werden. Des Weiteren ist der Versuchswerkstoff hinsichtlich seiner chemischen Zusammensetzung, seines Gefüges, seiner mechanisch- technologischer Eigenschaften zu charakterisieren und anhand der Ergebnisse seine Heißrissempfindlichkeit abzuschätzen.

3.1 Chemische Analyse der Versuchswerkstoffe

Die chemische Zusammensetzung der für die experimentellen Untersuchungen verwendeten zweiundzwanzig AlMgSi1-Bleche, die von drei verschiedenen Herstellern bezogen und aus verschiedenen Chargen entnommen worden sind, ist in Tabelle 1 wiedergegeben. Die Werkstoff- und Zustandsbezeichnung der AlMgSi1-Bleche lautet nach EN 573 und EN 515 und in Anlehnung an die Bezeichnungen der Aluminium Association, USA: **6082 T6**. Die Werkstoffzustandsbezeichnung T6 bedeutet, dass dieser Werkstoff warmausgelagert, d. h. warmausgehärtet ist. Die verwendeten Schweißzusatzwerkstoffe für das MIG-Schweißen, der S-AlMg5, Werkst.-Nr. 3.3556 bzw. R-5056A und der S-AlSi5, Werkstoff-Nr. 3.2245 bzw. R-4043A, wurden nach der Empfehlung in DIN EN 1011-4 ausgewählt /3/.

Die Versuchsbleche haben die Bezeichnung M, T und 1 bis 20. Merkliche Abweichungen bei den chemischen Analysewerten traten im Si- Zn –und Ti- Gehalt nur bei den Blechen M und T auf, Tab.1.

3.2 Probenformen und Probenherstellung

Die verwendeten Versuchswerkstoffe lagen als Bleche mit unterschiedlichen Abmessungen vor. Die Bleche „T und M“ hatten die Abmessung 1000 mm x 2000 mm x 10 mm und die Bleche „1 bis 20“ hatten die Abmessung 500 mm x 500 mm x 10 mm. Aus den Blechen T und M wurden jeweils sechs Flach-Zugproben „Zugprobe DIN 50 125-E 10 x 25 x 90“, Abb. 3, entnommen: vier Proben längs zur Walzrichtung (Bezeichnung mit **L**) und zwei Proben quer (Bezeichnung mit **Q**) zur Walzrichtung. Zur Herstellung von jeweils sechs Kreuzzugproben,

mit der Bezeichnung M (T) 1 L bis M (T) 6 L bzw. M (T) 1 Q bis M (T) 6 Q, Abb. 4, wurden zwölf Rippenstücke, 80mm x 300 mm x 10 mm, und vierundzwanzig Einspannstücke, 150 mm x 300 mm x 10 mm, durch Sägen den Blechen entnommen. Ferner wurden von den zweiundzwanzig Versuchsblechen, für Heißrissprüfungen nach dem Modifizierten Vastrestraint-Testverfahren (MVT-Verfahren), jeweils fünf MVT-Proben längs zur Walzrichtung und fünf Proben quer zur Walzrichtung, Abb. 4, ebenfalls durch Sägen aber ohne weitere Bearbeitung hergestellt. Die Probenbezeichnung der MVT-Proben entsprach der der Kreuzzugproben, M (T)1 L bis M (T)10 L und M (T) 1 Q bis M (T) 10 Q. Nach demselben Vorgehen wurden für Schlagbiegeversuche aus jedem Blech jeweils fünf ISO-V-Proben nach DIN EN 10 045-1, längs und quer zur Walzrichtung durch Sägen entnommen. Die anschließende spanende Fertigung erfolgte, unter Einhaltung der Maßtoleranzen, gemäß den Vorgaben des genannten Regelwerkes.

3.21 Schweißen der Schweißprobe (Coupon) für Kreuzzugprobe nach dem MIG- Verfahren

Die Blechteile für die Kreuzzugprobe wurden nach dem Sägen auf Maß gefräst, die Kanten gebrochen und in eine eigens zum Schweißen der Schweißprobe hergestellte Haltevorrichtung eingelegt. Vor dem MIG-Schweißen der Kehlnähte wurde die Oxidschicht der Kehlnahtflächen mit Schmirgelpapier abgeschliffen. Die Kehlnähte wurden, um den Verzug klein zu halten, in einer bestimmten Reihenfolge, Abb. 4, mit dem Schweißzusatzdraht S-AlMg5 und S-AlSi5 geschweißt. Die verwendete Stromquelle, SAPROM 900, ermöglicht das MIG- und MAG-Schweißen mit und ohne Impulslichtbogen. Die Einstellwerte wurden so gewählt, dass der Lichtbogen im „Sprühlichtbogenbereich“ arbeitete. /5/. Mit folgenden Einstellwerten und Vorgaben wurde geschweißt:

- Gleichstrom, I:	280 A bis 310 A
- Spannung, V:	28,5 V bis 31 V
- Schweißgeschwindigkeit, v:	32 cm/min bis 35 cm/min
- Freie Drahtlänge, l:	17 mm und 20 mm
- Schweißzusatzwerkstoffe:	S-AlMg5, W.-Nr. : 3.3556 bzw. R-5056A S-AlSi5, W.-Nr.: 3.2245 bzw. R.4043A
- Drahtdurchmesser d ₁ :	1,6 mm
- Düsendurchmesser, D:	20 mm
- Gasdruck (Volumen) p:	8 bar bis 10 bar
- Schutzgas:	Helium/Argon 30/70
- Streckenenergie, Q:	12 kJ/cm bis 14,5 kJ/cm
- Arbeitstemperatur, T:	20°C
- Nahtfolge:	jeweils gegenüberliegende Naht
- Kehlnahtdicke, a:	ca. 6 mm einlagig
- Vorwärmtemperatur, T _v :	keine

Die Versuchsdaten wurden registriert und protokolliert. Teilweise begleitende metallographische Untersuchungen an Querschliffen erlaubten die mikroskopische und makroskopische Beurteilung der Kehlnähte während der Fertigung der Schweißproben.

3.22 Metallographische Untersuchung der Kehlnähte und des Grundwerkstoffes

Zur Beurteilung der Kehlnahtschweißung: der Nahtform, des Einbrandes, der Poren, der Lunker, der Heißrisse, des Gefüges und der Härte (HV1) der Schweißverbindung wurden Querschliffe hergestellt und metallographisch untersucht. In den Abb. 5 bis 9 ist das Gefüge des Grundwerkstoffes beispielhaft für ausgesuchte Schweißungen dargestellt. Härtewerte und das Gefüge in der Schweißverbindung sollen Abweichungen zu den zu erwartenden Werten (Gefügen) zeigen. Fraktographische Untersuchungen der Bruchflächen von den Flachzugproben, Abb. 10, sollen mögliche Anisotropieerscheinungen und mögliche Unterschiede in den Festigkeitskennwerten erklären. Hieraus lassen sich ein möglicher Einfluss

der Walzrichtung auf Wiederaufschmelzrissbildung (WAR) und auf die Bildung von Ductility Dip Cracks (DDC) ableiten.

Gefügeanalysen, die mit der Elektronenstrahlsonde durchgeführt wurden, Abb.11a bis 11d, sollen Aufschluss über die Anordnung, Verteilung und chemische Zusammensetzung der Mg₂Si-Ausscheidungen des Grundwerkstoffes mit der Wärmebehandlungs- Bezeichnung T6, Abb. 9, geben.

Über die Herstellung und metallographische Prüfung der Kreuzzugproben kann zusammenfassend vorweggenommen werden, dass die Kehlnahtschweißungen der Probeschweißungen mit dem Schweißzusatzwerkstoff S-AlSi5 fachgerecht und ohne nennenswerte Schweißimperfektionen ausgeführt worden sind, was sich auch durch die Bruchlage außerhalb der Schweißnaht bei den Zugversuchen an der Kreuzzugprobe bestätigte. Etwas komplizierter erwies sich das Schweißen der Schweißproben mit dem Schweißzusatzwerkstoff S- AlMg5. Infolge des stärkeren Abbrandes (Verdampfung) von Magnesium im Vergleich zum S-AlSi5-Schweißdraht ist der Porenanteil im Schweißgut höher, was sich auf das Bruchverhalten negativ auswirken kann. Heißrisse wurden, wie bei der S-AlSi5-Schweißnaht, nicht gefunden. Bis auf eine Ausnahme brachen die geprüften Kreuzzugproben im Grundwerkstoff am Rand der Wärmeeinflusszone. Bei der im S- AlMg5-Schweißgut gebrochenen Probe handelt es sich um einen Bruch, der durch die verhältnismäßig hohe Porosität im Wurzelbereich initiiert worden ist.

3.3 Zugversuch an Rundzugprobe und an Flachzugprobe

Mit den Ergebnissen der thermomechanischen Zugversuche, der Festigkeitskennwerte und der Fließkurven soll gezeigt werden, ob es in der Wärmeeinflusszone spröde oder weiche Zonen gibt, die in einem ursächlichen Zusammenhang mit der DDC-Anfälligkeit des Versuchswerkstoffes beim MV-Test stehen könnten.

Dazu wurden Norm-Rundzugproben (8mm Durchm. und 75mm Länge) dem M- und T-Blech entnommen und thermomechanische Belastungsversuche zur Ermittlung von Fließkurven (wahre Spannung über wahre Dehnung) durchgeführt. Als Versuchsparameter für die Zustände, Lieferzustand Lösungsglühzustand, wurden gewählt: die Auslagerungstemperatur und die Auslagerungszeit sowie die Prüftemperatur, Tabelle 7.

Zur Ermittlung der mechanischen Werkstoffkennwerte und möglicher Anisotropieerscheinungen des Versuchswerkstoffes wurden zusätzlich Zugversuche an der Flachprobe, Abb. 3b, die längs und quer zur Walzrichtung aus den Blechen M und T entnommen worden sind, durchgeführt. In Tab. 3 sind die Ergebnisse aufgelistet.

3.4 Kerbschlagbiegeversuch

Die Chargenabhängigkeit der mechanisch-technologischen Eigenschaften und anisotropes Werkstoffverhalten lassen sich sehr differenziert im Kerbschlagbiegeversuch nachweisen. Mit den Ergebnissen war beabsichtigt, eine mögliche Korrelation zu den Ergebnissen aus Heißrissversuchen herzustellen. Die Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche sind in Tab. 4 und Abb.12 aufgeführt. Die Bruchtopographie der geprüften Proben soll den Einfluss der Lage der Probe zur Walzrichtung und die chargenabhängige Zähigkeit in der Art der makroskopischen und mikroskopischen Bruchflächenerscheinung, Abb. 13a bis 13d, wiedergeben.

3.5 Zugversuch an Kreuzzugprobe nach Entwurf DIN 4113 Teil 2 Anhang 222

Die Kreuzzugprobe, die durch ihre Probengeometrie eine hohe Spannungsmehrachsigkeit induziert, eignet sich als Schweißbeignungsprüfung für geschweißte Bauteile: zur Bauteilprüfung. Die Ergebnisse der Versuche an Kreuzzugproben sind in Tabelle 5 aufgelistet. In umfangreichen Schweißvorversuchen mit dem Schweißzusatzdraht S- Al Si5 und S- AlMg5, wurden die Schweißparameter und das Schweißschutzgas so lange variiert, bis eine jeder Augenscheinprüfung gerecht werdende optimale Kreuzstoßnaht erzielt wurde.

3.6 Transvarestraint Heißrissuntersuchung nach dem „Modifizierten Varestraint-Transvarestraint-Verfahren (MVT)“

Das MVT- Verfahren eignet sich gut zur Heißrissbeurteilung von Grundwerkstoffen, Schweißgütern und von Schweißverbindungen, sowie zur Optimierung der Schweißbedingungen zur Herstellung heißrissfreier Verbindungen. Das Verfahren ist international anerkannt und hat sich bestens für Stähle und für Ni- Basislegierungen bewährt /9/. Für Al- Legierungen sind die Erfahrungen geringer.

Die zu prüfenden Proben haben eine Abmessung von 100x40x10mm. Bei Standardversuchen wird eine WIG- Aufschmelzraupe in Probemitte längs auf die Oberseite der Probe geschweißt /8/. Bei Brennerstellung in der Mitte der Probe wird die Probe über eine Matrize gebogen. Zur Einstellung unterschiedlicher Biegedehnungen wird der Matrizenradius variiert. Die Schweißparameter für die Aufschmelzraupe werden mit einer WIG-Stromquelle und die Schweißgeschwindigkeit mit einer Vorschubeinrichtung stufenlos geregelt. Als Schutzgas wurde ein Mischgas mit 50 % Helium und 50% Argon verwendet, das in Vorversuchen getestet und ausgewählt worden ist. Prüfkriterium für die Heißrissneigung eines Werkstoffes ist die Gesamtrisslänge, die von Prüfbedingungen abhängig ist. Die Gesamtrisslänge ergibt sich aus der Summe der jeweiligen Einzelrisslängen der im MVT- Versuch erzeugten Heißrissarten.

Das Ergebnis der MVT- Versuche kann schon an dieser Stelle vorweggenommen werden. Bei sämtlichen Versuchen mit unterschiedlichen Biegedehnungen von 0,25%, 0,5%, 1%, 2% und 4% und Streckenergien von ca. 8 kJ/cm, 10kJ/cm und 14 kJ/cm sowie mit unterschiedlichen Schutzgasen kam in 97% aller Versuche das gleiche Ergebnis für die geprüften 22 Bleche heraus, nämlich ein Mittennahriss mit einer Länge von ca. 20mm bis 40mm. Die Rissbildung erfolgte z.T. vor und nach dem Passieren des Brenners der Mitte der Probe, wo die größte Biegedehnung auftritt.

Der Rißpfad endete stets im Grundwerkstoff oder am Übergang Grundwerkstoff zur WEZ, Abb.14, 15a,16a und 17a. Da der Mittennahriss bei sämtlichen Schweißparametern und Biegedehnungen aufgetreten ist, ist eine wissenschaftliche Auswertung der MVT-Versuche nach Rissart und Risslänge nicht möglich. Ferner zeigen die Befunde, was schon vermutet worden war, dass die chemische Zusammensetzung des Grundwerkstoffs im Bereich der größten Heißrissempfindlichkeit liegt. Die Kehlnähte der Kreuzzugproben, die mit Schweißzusatzwerkstoffen mit höherem Si- bzw. Mg- Gehalt (jeweils 5%) geschweißt wurden, zeigen keine Heißrisserscheinungen. Es ist nicht auszuschließen, dass das MVT- Verfahren für Heißrissprüfung an Al- Legierungen noch besser abzustimmen ist.

4 Diskussion der Ergebnisse

4.1 Vergleich der chemischen Zusammensetzung

Die Befunde der Spektralanalyse von den 22 untersuchten Al- Blechen, Tab.1, zeigen in nur wenigen Ausnahmefällen größere Abweichungen vom Mittelwert des prozentuellen Anteils der Legierungselemente aller Bleche. Eine Ausnahme ist z. B. der Si-Gehalt des Bleches MQ, der um ca. 21% vom Mittelwert abweicht. Eine weitere Ausnahme in der Abweichung des Ti- Gehaltes vom Mittelwert (ca.400%) zeigt das Blech T Q. Eine Auswirkung der Abweichungen auf die Schweißbeignung dieser Bleche konnte mit den angewendeten Untersuchungsverfahren nicht festgestellt werden. Eine Summenformel für Grenzwerte heißrissverursachender Elemente in Al-Legierungen gibt es bisher noch nicht.

4.2 Vergleich der Festigkeitskennwerte aus Zugversuch mit denen aus Werkstofftabellen

Die Streckgrenze, Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Brucheinschnürung der geprüften Flachzugproben, Tab.3, die längs und quer aus den Blechen „M und T“ entnommen worden sind, zeigen nahezu keine Anisotropie. Der Einfluß der Probenlage zur Walzrichtung ist un-

bedeutend, die Streuung der Meßergebnisse liegt im Rahmen der Meßgenauigkeit. Auffallend sind die verhältnismäßig hohen Werte der Bruchdehnung im Vergleich zu den Sollwerten nach Norm. Die Abweichungen betragen bis zu 100% bei den Längsproben, die der Querproben betragen bis zu 80%. Die Festigkeitskennwerte und Verformungskennwerte entsprechen der normgerechten AlMgSi1-Legierung.

Die Ergebnisse der Zugversuche an Rundzugproben, an der die unterschiedlichen Werkstoffzustände eingestellt wurden und die bei verschiedenen Temperaturen geprüft worden sind, zeigt Tab.7. Die Bruchspannungswerte beziehen sich auf den beim Bruch vorhanden gewesenen Querschnitt. Sie sind höher und lassen sich auch deshalb nicht direkt mit den an den Kreuzzugproben ermittelten vergleichen. Der Einfluß der Auslagerungszeit und -temperatur auf die Werkstoffkennwerte entspricht den metallphysikalischen Vorstellungen der Ausscheidungshärtung. Der Temperatureinfluß auf die Zugfestigkeit zeigt deutlich die Grenzen des Einsatzes von aushärtbaren Al-Legierungen als Konstruktionswerkstoff im Leichtbau. Ferner wird der Einfluß der Schweißwärme auf die Festigkeit in der Wärmeeinflusszone veranschaulicht. Die lösungsgeglühten Proben, die bei Raumtemperatur geprüft wurden, haben eine um ca. 100MPa niedrigere Zugfestigkeit als der Grundwerkstoff. Durch eine schweißsimulierende WEZ-Wärmebehandlung der Rundzugproben könnten gezielt WEZ-Eigenschaften eingestellt und bewertet werden, was nicht der Gegenstand der Untersuchung war.

4.3 Vergleich der Kerbschlagarbeit der untersuchten Bleche

In Abb.12 und in Tab.4 ist die Kerbschlagarbeit aller untersuchten AlMgSi1-Bleche dargestellt. Der Mittelwert aller Kerbschlagarbeiten beträgt ca. 19 Joule. Der Risswiderstand (Kerbschlagarbeit) ist von der Rissebene und sehr stark vom Blech (Charge) abhängig. Die Abweichung der KV-Werte vom Blech T3 zum Mittelwert beträgt mehr als 270%. Sämtliche Proben mit L- T- Rissebene haben KV-Werte die unterhalb des Mittelwertes der Kerbschlagarbeiten liegen. Zusammenfassend ist festzustellen, dass die KV-Werte sehr stark streuen, was im Widerspruch zu den Festigkeits- und Verformungskennwerten steht. Als Ursache für diese große Streuung können fertigungsbedingte Einflußgrößen wie z.B. Walztemperatur, Walzgrad und Auslagerungstemperatur und -zeit sowie Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung angesehen werden. Eine Korrelation zur Heißrissempfindlichkeit der untersuchten Bleche konnte nicht hergestellt werden, weil, wie in 3.6 dargestellt, prüfverfahrensbedingte Einflüsse auf die Heißrissempfindlichkeit nicht ermittelt werden konnten. Fazit: Die Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche zeigen deutlich, dass die Streuung der Kerbschlagarbeit (Zähigkeit) von der Charge, vom Lieferzustand (Werkstoffzustand) und von der Rissebene beeinflusst ist. Dies sollte bei der Konstruktion und bei Sicherheitsnachweisen von Bauteilen sowie bei der schweißtechnischen Verarbeitung dieses Werkstoffes berücksichtigt werden.

4.4 Vergleich der maximalen Zugspannung der Kreuzzugproben

Die maximale Zugspannung der Kreuzzugproben haben bis auf eine Ausnahme, Probe 611, den Mittelwert von 217 MPa. Die Streuung der Werte ist auffallend gering, sie beträgt maximal 6 %. Vergleicht man diese Werte mit der Zugfestigkeit der untersuchten Standard-Rundzugproben und -Flachzugproben von ca. (325 MPa), der Vergleich ist nicht ganz korrekt, (Kreuzzugprobe ist eine Bauteilprobe) so fällt auf, dass die maximalen Zugspannungswerte um ca.100 MPa niedriger sind. Normalerweise werden, durch die Probengeometrie bedingt, höhere maximale Zugspannungen erwartet. Als mögliche Ursache für die geringere Festigkeit ist die durch die Schweißwärme, sie liegt im Bruchbereich oberhalb der Rekristallisationstemperatur, bewirkte Verminderung der Kaltverfestigung (Entfestigung) anzusehen. Eine fehlende Ausscheidungshärtung kommt als Ursache nicht in Betracht, weil die Proben vor dem Zugversuch über 60 Tage kalt ausgelagert wurden und dadurch die erforderliche Auslagerungsdauer für die Kaltaushärtung weit überschritten worden ist. Eine Überalterung scheidet ebenfalls aus, weil diese bei Raumtemperatur nicht auftreten kann. Gestützt wird diese Aussage durch die Zugfestigkeitwerte der Rundzugproben, die im lösungsgeglühten

Zustand geprüft wurden, Tab. 7, Probe M3-5, T-9 und T10-3. Ihre Festigkeitskennwerte liegen ebenfalls im Bereich von ca. 220 MPa.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass durch das Schweißen, der WEZ-nahe Bereich lösungsgeglüht und dadurch die Kaltverfestigung rückgängig gemacht wurde. Die Zugfestigkeit des Grundwerkstoffes (ca. 325 MPa) wurde nicht erreicht.

4.5 Ergebnisse der MVT-Versuche

Wie unter 3.6 beschrieben, ließen sich die MVT- Ergebnisse nicht wissenschaftlich auswerten. Nahezu sämtliche untersuchten MVT- Proben zeigten den Mittennahtriss von einer Länge bis zu 40mm. Der Risspfad der erzeugten Erstarrungsrisse endete im Grundwerkstoff in der Nähe der WEZ. Durch Wahl eines geeigneteren Schweißverfahrens können solche Defekte vermieden werden. Eine Wiederholung der Versuche mit einer noch zu installierenden besseren Stromquelle soll die Heißbrissursachen erklären helfen.

4.6 Ergebnisse der metallographischen Untersuchungen

4.61 Härtewerte

In den Tabellen 2 und 6 sind die Härtewerte (HV1) von ausgesuchten Kreuzzug-Schweißproben und von einer MVT- Probe dargestellt. Die Härteverteilung quer zur Schweißrichtung, Abb. 9 und 18 und Tabellen 2 und 6 weist keine Besonderheiten aus. Das Schweißgut hat danach die niedrigsten Werte, ca. 60 HV1. Als Ursache ist zu berücksichtigen, dass das Schweißgut nicht aushärtend ist.

4.62 Gefüge

Die Gefügeaufnahmen von den Grundwerkstoffen zeigen licht- und rasterelektronenmikroskopisch keine großen Unterschiede. Zu sehen ist ein feines Walzgefüge (Zeilengefüge) mit der Ausscheidungsphase Mg₂Si, Abb. 5a bis c, Abb.6a bis c und Abb.11a bis d. Die Verteilung und Größe der Mg₂Si- Teilchen variieren in mittleren Grenzen, die Zeiligkeit ebenso. In Abb.7a ist der Übergang vom Schweißgut zum Grundwerkstoff abgebildet. Das dendritische Schweißgut ist fein ausgebildet, 7a und b, die WEZ nur angedeutet, Abb. 7a, was auf eine einwandfreie Schweißung schließen läßt. Ein Querschliff von einer Schweißprobe für Kreuzzugproben ist in Abb.8 dargestellt. Die Kehlnähte zeigen vereinzelt einige Poren, was bei Al-Legierungen unvermeidlich ist, und, wie geprüft, keinen Einfluß auf die Festigkeit ausgeübt hat. Heißrisse konnten in allen Probeschweißungen nicht nachgewiesen werden.

4.63 Bruchflächenerscheinungen

Rasterelektronenmikroskopische REM- Aufnahmen von ausgesuchten Bruchoberflächen der geprüften Kerbschlagbiegeproben sind in den Abb. 13a bis 13d dargestellt. Die Bruchtopographie ist sehr unterschiedlich, sie kennzeichnet eine glatte wenig strukturierte Bruchfläche, Abb.13b bis hin zur stark strukturierten Bruchfläche mit tiefen „Separations-“ (blättereartige) Bruchflächenerscheinungen, Abb.13d. Die Kerbschlagarbeit der Probe M3- 10 (T-L), Abb. 13b beträgt 7J, was für diesen Werkstoff extrem niedrig ist. Von der Bruchflächenstruktur kann auf die Lage der Probe zur Walzrichtung des Bleches geschlossen werden und erklärt auch die großen Unterschiede der Kerbschlagarbeit.

4.64 Heißrisse in MVT-Proben

In den Abb. 14a und 14b, 15a bis 15c, 16a bis 16e sowie 17a bis 17c und 18 sind die im MVT-Versuch erzeugten Heißrisse dargestellt. Dabei handelt es sich überwiegend um Mittennaht-

risse, das sind Erstarrungsrisse (ER), vereinzelt sind auch Wiederaufschmelzrisse (WAR) an der Grenzfläche Schweißgut zur WEZ zu sehen, Abb. 14b, 15c und 17c. Der Rissverlauf der Erstarrungsrisse ist interdendritisch und der der WAR interkristallin. Einige DDC- Risse konnten in den Schliffen 14b und 17c nachgewiesen werden. Über die Ursachen der DDC- Rissigkeit in Al- Legierungen gibt es noch keine wissenschaftlich fundierten Kenntnisse. Es wird angenommen, dass sich auf den Korngrenzen spröde Phasen ausscheiden, die bei einer kritischen Belastung aufreißen /10/.

5 Schlussbemerkung und Ausblick

Die Ergebnisse der durchgeführten Schweißungen und die der Prüfung der Zug-, MVT- Kerbschlagbiege- und Kreuzzugproben sowie die chemischen und metallographischen Befunde ergaben, dass die untersuchte Al-Legierung AlMgSi1 heißrissempfindlich ist. Mit geeigneten Schweißzusatzwerkstoffen lassen sich jedoch in Schweißnähten Heißrisse vermeiden. Als Ursache für die Heißrissempfindlichkeit des Grundwerkstoffes ist die chemische Zusammensetzung anzusehen, die sich in dem geringen Mg- und Si-Anteil manifestiert. Die um ca. 100 MPa geringere maximale Zugspannung (Vergleichbar mit Zugfestigkeit) der Kreuzzugproben ist überwiegend auf die Entfestigung des Werkstoffes im Bereich der WEZ infolge der Wärmeeinbringung und Rekristallisation beim Schweißen zurückzuführen. Da die Entfestigung bleibend ist, d.h. auch nicht durch Kaltaushärtung (Kaltauslagerung) rückgängig gemacht werden kann, stellt dies ein Problem für die Sicherheit von geschweißten Bauteilen aus aushärtbaren AL-Legierungen dar.

Weiterführende Untersuchungen nach einem fundierten Sicherheitskonzept sind noch erforderlich. Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Untersuchungen reichen bei weitem nicht aus, um eine belastbare Sicherheitsbeurteilung abgeben zu können.

5 Literaturhinweise

- /1/ IIW Doc. IX- 1273-83
- /2/ Cross, C. E., Tack, W. T., Loechel, L. W., in: Reprint „ASM international“ Nr. 9001-01
- /3/ Schuster, J., Steffen, K., Schulze, E. und Maly, H.: Schweißen & Schneiden 51 (1999) H. 5, S. 252-257.
- /4/ Schulze, G., Krafka, H. und Neumann, P. in: Schweißtechnik, 2. Aufl. (1996), Springer Verlag (VDI- Buch)
- /5/ Schoer, H., in: Schweißen und Hartlöten von Aluminiumwerkstoffen Fachbuchreihe Schweißtechnik Band 137, (1998), DVS- Verlag
- /6/ Hufnagel, W. und Mitarbeiter in: Aluminium- Taschenbuch 14. Aufl. (1984), Aluminium- Verlag Düsseldorf
- /7/ Ostermann, F. in: Anwendungstechnologie Aluminium 1. Aufl. (1998), Springer Verlag (VDI- Buch)
- /8/ Krafka, H. in: DVM- Berichtsband 232 (2000), Festigkeits- und Bruchverhalten von Fügeverbindungen
- /9/ Wilken, K. und Kleistner, H.: Material und Technik, (1982), S. 3- 10.
- /10/ Schuster, J.: Schweißen und Schneiden, 50 (1998), H. 10, S. 646- 654.

Tab. 1: Ergebnis der Spektralanalyse am Funkenemissionsspektrometer OBLF QSL 1500 der untersuchten Al Mg Si 1 - Bleche

Probenr.	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Bi	Ni	Cd	Pb	Sn	Zr
M Q	1,072	0,269	0,054	0,437	0,74	0,009	0,056	0,028	<0,0001	0,0036	0,0006	0,0021	0,0011	0,0021
T Q	0,845	0,395	0,055	0,494	0,72	0,04	0,034	0,069	<0,0001	0,004	0,0005	0,0054	0,0024	0,0014
1 L	0,91	0,441	0,03	0,529	0,82	0,015	0,015	0,017	<0,0001	0,0045	0,0004	0,0027	0,0015	0,0008
2 L	0,86	0,421	0,032	0,511	0,86	0,013	0,016	0,017	0,0024	0,0041	0,0004	0,0026	0,0018	0,0008
3 Q	0,876	0,432	0,032	0,524	0,86	0,014	0,016	0,018	0,0025	0,0044	0,0006	0,0028	0,0014	0,0008
4 Q	0,852	0,431	0,031	0,512	0,84	0,014	0,016	0,018	0,0021	0,0041	0,0005	0,0024	0,0014	0,0009
5 Q	0,82	0,415	0,031	0,506	0,85	0,013	0,015	0,019	0,0036	0,0039	0,0005	0,0026	0,0016	0,0009
6 Q	0,872	0,441	0,03	0,529	0,83	0,015	0,016	0,018	0,0013	0,0043	0,0006	0,0026	0,0017	0,001
7 Q	0,899	0,451	0,031	0,533	0,85	0,015	0,017	0,017	0,0014	0,0045	0,0006	0,0028	0,0019	0,0009
8 Q	0,903	0,452	0,03	0,525	0,84	0,015	0,017	0,017	0,0002	0,045	0,0003	0,0027	0,0018	0,0009
9 Q	0,907	0,459	0,03	0,527	0,84	0,015	0,017	0,017	0,0002	0,0045	0,0003	0,0027	0,0021	0,0009
10 Q	0,901	0,451	0,03	0,525	0,85	0,015	0,017	0,017	0,0005	0,0045	0,0004	0,0026	0,0021	0,0009
11 Q	0,892	0,453	0,03	0,528	0,85	0,015	0,018	0,017	0,0007	0,0045	0,0004	0,0028	0,0021	0,0009
12 Q	0,886	0,448	0,031	0,526	0,86	0,015	0,017	0,017	0,0016	0,0045	0,0005	0,0028	0,002	0,001
13 Q	0,882	0,449	0,03	0,526	0,84	0,015	0,017	0,018	0,0008	0,0044	0,0004	0,0027	0,0022	0,0009
14 Q	0,873	0,45	0,03	0,52	0,84	0,015	0,017	0,018	0,0007	0,0043	0,0004	0,0026	0,0019	0,001
15 Q	0,826	0,433	0,033	0,511	0,89	0,012	0,017	0,018	0,0053	0,004	0,0005	0,0026	0,0022	0,0009
16 Q	0,823	0,441	0,033	0,513	0,88	0,012	0,016	0,018	0,0045	0,0041	0,0005	0,0025	0,0021	0,001
17 Q	0,848	0,425	0,031	0,51	0,87	0,014	0,018	0,018	0,0032	0,0042	0,0005	0,0026	0,0021	0,001
18 Q	0,878	0,46	0,031	0,528	0,86	0,015	0,018	0,017	0,0015	0,0044	0,0006	0,0028	0,0025	0,001
19 Q	0,885	0,456	0,031	0,522	0,85	0,15	0,018	0,017	0,0013	0,0044	0,0003	0,0026	0,0022	0,001
20 Q	0,886	0,456	0,031	0,523	0,86	0,015	0,018	0,017	0,0015	0,0044	0,0004	0,0027	0,0025	0,001

Härtemessung: HV 1

Lage der Härteeindrücke	Probe T 1 Q 17 HV 1	Probe M - Mg-2 HV 1	Probe T - Mg-1 HV 1
GW	71	74	56
	65	70	55
	60	66	47
	60	56	59
		66	60
WEZ	66	84	56
	67	89	54
	68	89	62
	70		
	70		
	64		
SG	64	66	60
	66	61	64
	65	61	63
	62	58	52
	67	63	61
	67	64	
	64	62	
	66		
WEZ	70	62	53
	66	65	51
	66		50
	66		
	69		
GW	65	57	56
	59	61	52
	70	65	47
	73		

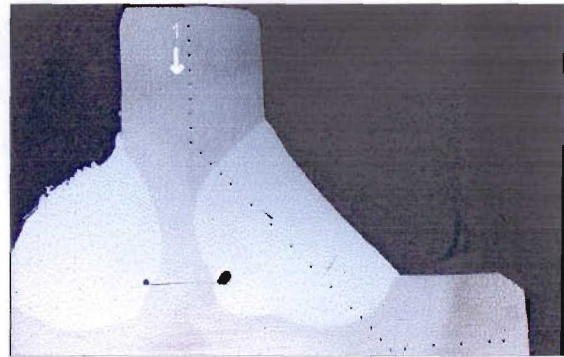
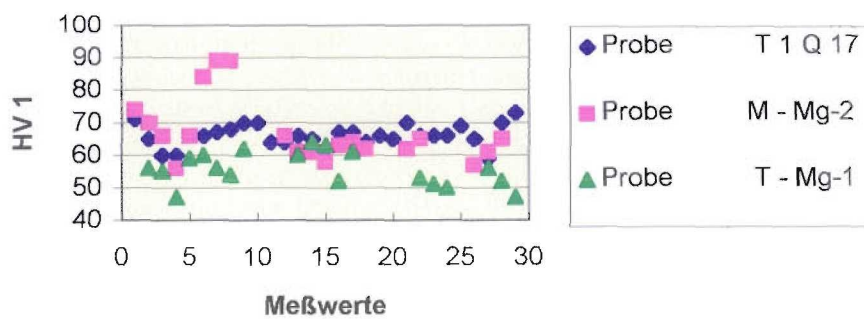


Abb.: 9 Lage der Härteeindrücke am Bspl. T 1 Q17



Tab.2: Härtewerte (HV 1) der Kehlnähte der drei Schweißproben mit grafischer Darstellung

Proben-Nr.	Maße [mm]		Fläche A [mm ²]	Streckgrenze [N/mm ²]		Zugfestigkeit [N/mm ²]		Bruch- dehnung A [%]	Bruchein- schnürung Z [%]	Bemerkungen, Bruchfläche Bruchlage, Bruchart
	a	b		F _{0,2}	Rp _{0,2}	Fm	Rm			
M 1 L	10,05	25,00	251,25	73,625	293	81,830	326	21,0	34,4	relativ verformungsarm und spröde, keine Scherlippen
M 2 L	10,05	25,00	251,25	74,125	295	82,270	327	19,2	34,1	
M 3 L	10,05	25,05	251,7525	73,000	290	82,270	327	19,6	32,2	
M 4 L	10,05	25,00	251,25	73,375	292	81,790	326	20,2	34,4	
T 1 L	10,00	25,00	250	74,125	297	82,845	331	17,6	26,1	
T 2 L	10,00	25,00	250	74,750	299	83,275	333	16,8	27,0	
T 3 L	9,95	25,00	248,75	74,250	298	82,995	334	16,1	28,2	
T 4 L	10,00	25,00	250	74,875	300	82,960	332	15,3	26,7	
M 1 Q	10,05	25,00	251,25	69,625	277	81,040	323	18,1	29,7	
M 2 Q	10,05	25,00	251,25	69,500	277	80,840	322	18,4	29,4	
T 1 Q	9,95	25,00	248,75	74,125	298	82,845	333	15,4	22,5	
T 2 Q	10,00	25,00	250	74,500	298	83,290	333	17,0	25,2	

Tab. 3: Ergebnisse der Prüfung an Flachzugproben

Tab.4: Kerbschlagarbeit der 22 geprüften AlMgSi1 - Bleche

Probe-Nr.	Probenlage	KV [J]	KV Mittelwert [J]	KV Mittelwert [J] für Probenlage
M 3	1 T-S	8	7,5	T-S 8 T-L 7
	2 T-S	8		
	3 T-S	8		
	4 T-S	8		
	5 T-S	8		
	6 T-L	7		
	7 T-L	7		
	8 T-L	7		
	9 T-L	7		
	10 T-L	7		
	11 T-S	8		
	12 T-L	7		
	13 T-S	8		
T 10	1 T-S	28	18,3	T-S 25,9 T-L 11,8
	2 T-S	20		
	3 T-L	11		
	4 T-S	19		
	5 T-L	11		
	6 T-S	24		
	7 T-S	30		
	8 T-L	12		
	9 T-S	33		
	10 T-S	27		
	11 T-L	12		
	12 T-L	13		
	13 T-L	13		
	14 T-L	11		
	15 T-L	11		
3 L	1 L-T	17	18,4	L-T 18,4
	2 L-T	19		
	3 L-T	19		
4 L	1 L-T	15	16	L-T 16
	2 L-T	15		
	3 L-T	18		
5 L	1 L-T	17	18,1	L-T 17 L-S 21
	2 L-T	17		
	3 L-S	21		
6 L	1 L-S	20	19,6	L-S 19,6
	2 L-S	20		
	3 L-S	19		
8 L	1 L-S	25	24,5	L-S 24,5
	2 L-S	24		
	3 L-S	-		

Probe-Nr.	Probenlage	KV [J]	KV Mittelwert [J]	KV Mittelwert [J] für Probenlage
9 L	1 L-S	32	28,2	L-S 28,2
	2 L-S	28		
	3 L-S	25		
10 L	1 L-T	18	18,5	L-T 18,5
	2 L-T	18		
	3 L-T	20		
11 L	1 L-S	22	24,5	L-S 24,5
	2 L-S	28		
	3 L-S	23		
12 L	1 L-T	18	20,8	L-T 19 L-S 25
	2 L-S	25		
	3 L-T	20		
13 L	1 L-S	19	18	L-S 19 L-T 16
	2 L-S	19		
	3 L-T	16		
14 L	1 L-S	19	19,1	L-S 19,1
	2 L-S	19		
	3 L-S	19		
15 L	1 L-S	20	17	L-S 20 L-T 16
	3 L-T	15		
	4 L-T	17		
16 L	1 L-T	16	16,4	L-T 16,4
	2 L-T	16		
	3 L-T	18		
17 L	1 L-T	16	17,4	L-T 16 L-S 20
	2 L-S	20		
	3 L-T	16		
18 L	1 L-T	16	15,5	L-T 15,5
	2 L-T	15		
	3 L-T	16		
19 L	1 L-S	30	27,8	L-S 27,8
	2 L-S	29		
	3 L-S	25		
20 L	1 L-S	26	27,9	L-S 27,9
	2 L-S	32		
	3 L-S	26		
10	1 T-L	13	13,3	T-L 13,3
	2 T-L	14		
	3 T-L	13		
20	1 T-L	13	13	T-L 13
	2 T-L	13		
	3 T-L	13		

Charge (Maße)	Proben-		Kolbenweg bis Bruch [mm]	F max [kN]	Bruchlage	Rm (N/mm ²)	
	Name	Nr.					
T (10,0 x 50,0)	111	1	1	4	113,04	WEZ (GW)	226
		2	2	4,6	115,05	WEZ (GW)	230
	2 Q 11	1	3	4,3	108,22	WEZ	216
		2	4	5,3	109,41	WEZ / GW	219
		3	5	5,7	111,59	GW nahe WEZ	223
	T 2	1	6	2,7	33,27	SG (Bindefehler)	-
		2	7	2,2	44,98	SG (Bindefehler)	-
	T 3	1	8	4,5	106,06	WEZ / GW	212
		2	9	4,2	106,69	WEZ / GW	213
		3	10	3,6	108,57	WEZ / GW	217
		4	11	3,6	106,82	WEZ / GW	214
M (10,1 x 50,1)	611	1	12	2,9	111,43	SG	171
		2	13	3	113,81	WEZ / GW	227
		3	14	3,3	112,10	WEZ / GW	222
	3 Q 11	1	15	4,3	109,97	WEZ	217
		2	16	4	111,58	GW nahe WEZ	221
		3	17	3,7	113,62	GW nahe WEZ	225

Tab.5: Ergebnisse aus Zugversuchen an geschweißten Kreuz-Proben

Werkstoff: Al Mg Si 1

V_{abzug}: Nr.1: 2 mm/min

Nr.2 - 17: 1 mm/min

**AL Mg Si 1 MVT - Probe TL 8
mit 0,5 % Biegung**

Härtemessung: HV 1

Lage der Härteeindrücke	Probe T L 8 HV 1
GW	99
	95
	84
	86
	70
	73
	65
WEZ	67
	73
	73
SG	62
	63
	63
SG	55
	63
	63
	63
WEZ	73
	70
	64
GW	72
	80
	78

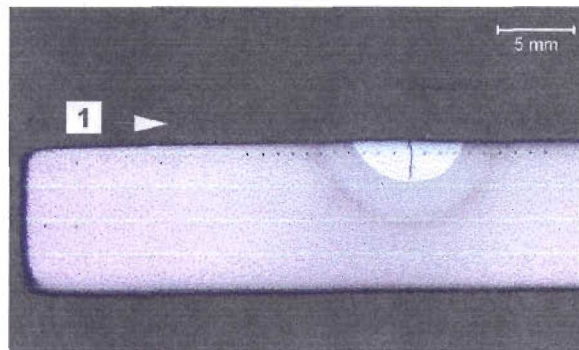
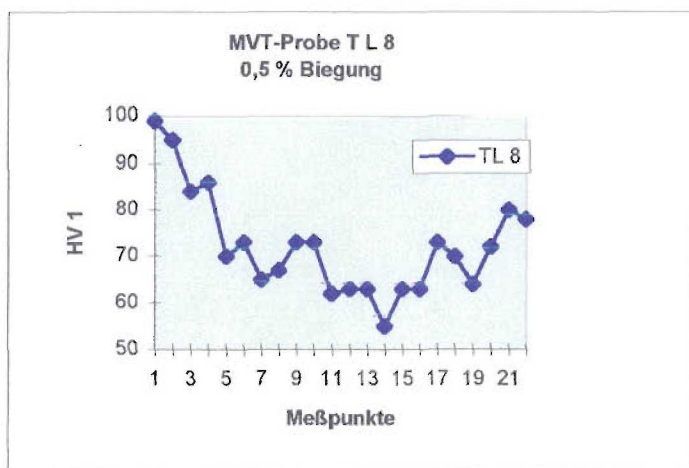


Abb. 18:
Lage der Härteeindrücke (Probe T L 8)



Tab.6: Härtewerte (HV 1) der MVT-Naht mit grafischer Darstellung

Probe-Nr.	Behandlungszustand	Versuchstemperatur	Bruchspannung [N/mm ²]	0,2%-Dehngrenze [N/mm ²]	Zugfestigkeit [N/mm ²]
M-1	LZ	RT	386,1	298,6	326,7
M-2	LZ	RT	398,9	299,3	326,1
M-3	LZ	RT	394,4	299,5	326,2
M3-1	LZ	RT	244,7 ↑↓	279,8	299,6
M3-3	LZ	RT	425,2	300,2	326,7
T10-1	LZ	RT	441,4	299,2	330,3
T-2	LZ	RT	304,2	250,4	271,7
T-3	LZ	RT	408,6	297,2	327,1
M-4	LZ	100°C	382,9	266,1	278,0
M-5	LZ	100°C	351,6	269,4	278,8
T-4	LZ	100°C	369,1	274,9	282,2
M-10	LZ	150°C		240,1	242,9
M3-4	LZ	150°C	298,6	233,3	237,6
T-5	LZ	150°C	237,7 ↓	257,4	257,6
T10-2	LZ	150°C	228,6 ↓	244,9	247,2
M-6	LZ	200°C	188,8 ↓	204,5	205,5
M-7	LZ	200°C		197,7	199,4
T-6	LZ	200°C	250,3	224,8	225,3
M-9	LZ	300°C		95,9	95,9
T-7	LZ	300°C	99,5 ↓	121,1	121,8
M3-5	Lö	RT	350,9	67,2	220,4
T-9	Lö	RT	230,1	62,3	206,2
T10-3	Lö	RT	404,0	68,1	202,1
M3-7	Lö	100°C	368,8	91,9	216,6
T-10	Lö	100°C	366,9	81,0	214,3
T10-8	Lö	150°C	242,7	70,2	217,3
M3-11	Lö	200°C	200,4 ↓	134,7	208,3
M-13	Lö/100°C/1h	RT	403,1	112,6	246,0
M-14	Lö/100°C/1h	100°C	391,0	114,3	224,3
M-15	Lö/100°C/4h	100°C	388,2	122,1	230,5
M3-6	Lö/150°C/1h	RT	375,0	185,9	287,9
M3-8	Lö/150°C/1h	150°C	318,2	163,0	228,6
M-17	Lö/150°C/4h	150°C	273,9	213,5	243,4
M3-9	Lö/150°C/4h	RT	420,2	271,4	337,5
M3-10	Lö/200°C/1h	RT	418,0	313,5	336,4

M-18	Lö/200°C/1h	200°C	198,9 ↓	221,4	223,4
M3-12	Lö/200°C/4h	200°C	211,4 ↓	211,7	211,8
M3-13	Lö/200°C/4h	RT	409,2	315,5	323,0
T10-4	Lö/150°C/1h	RT	383,1	136,5	247,0
T10-5	Lö/150°C/4h	RT	441,0	242,9	310,2
T10-6	Lö/150°C/1h	150°C	292,2	142,3	230,0
T10-7	Lö/150°C/4h	150°C	269,4	212,3	244,1
M-8	LZ/200°C/40min	RT	388,3	299,6	316,0
M-11	LZ/300°C/1h	RT	277,5	143,2	177,8
T-8	LZ/300°C/45min	RT	282,3	125,1	191,7

Tab. 7: Ergebnisse der Zugversuche an Rundzugproben in verschiedenen Werkstoffzuständen.

Zeichenerklärung: ↓ Festigkeitsabfall während des Versuchs
LZ Lieferzustand
Lö lösungsgeglühter Zustand (1h bei 520°C gegläht und in Wasser abgeschreckt)
RT Raumtemperatur

Beschreibung des Wärmebehandlungszustandes,
Ausgangszustand/Glühtemperatur/Glühdauer (z. B.
Lö/150°C/4h)

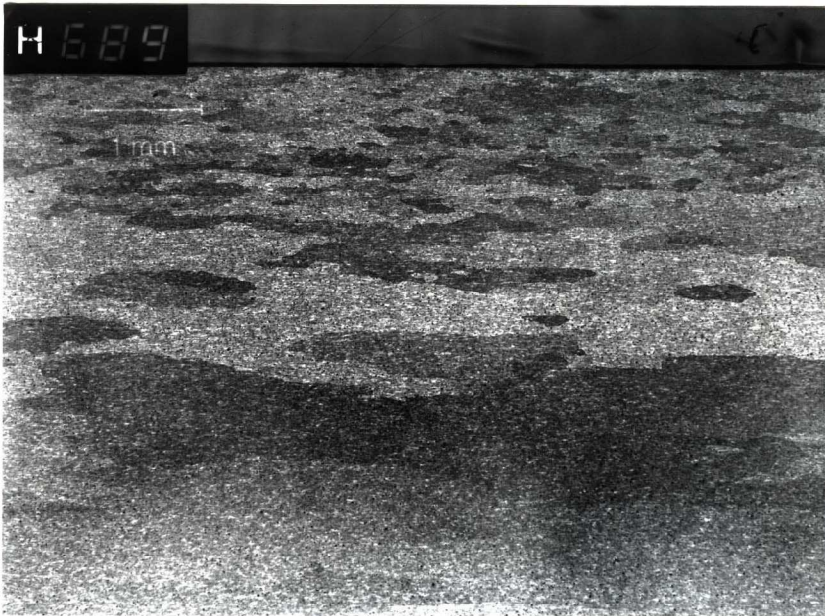


Abb.: 6 a
(Aufn.Nr.: H 689)
Gestreckte Körner quer zur
Walzrichtung mit intermetall.
Phasen (schwarze Punkte)
Ätzung: 5% MoO₃
V = 16 : 1



Abb.: 6 b
(Aufn.Nr.: H 690)
Gestreckte Körner längs zur
Walzrichtung mit intermetall.
Phasen (schwarze Punkte)
Ätzung: 5% MoO₃
V = 16 : 1

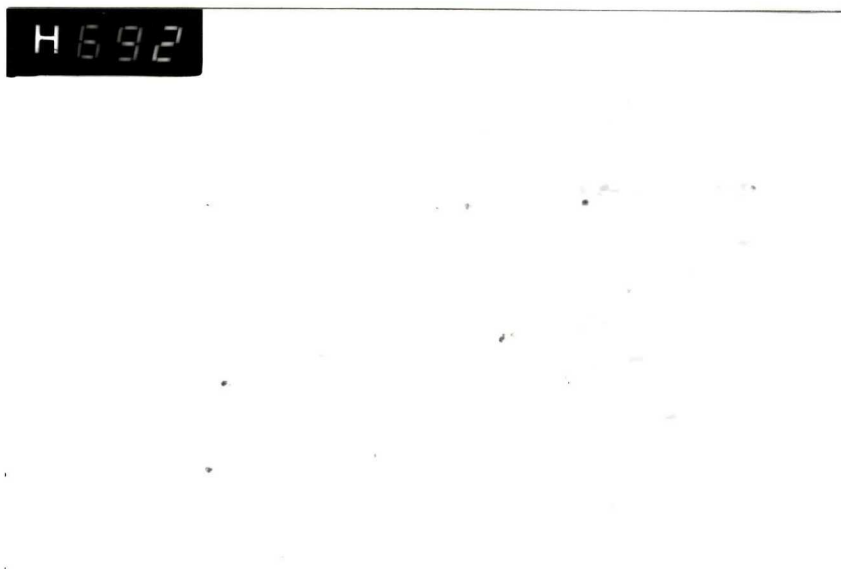


Abb.: 6 c
(Aufn.Nr.: H 692)
Verteilung der intermetall.
Phasen (Mg₂Si)
ungeätzt
V = 400 : 1

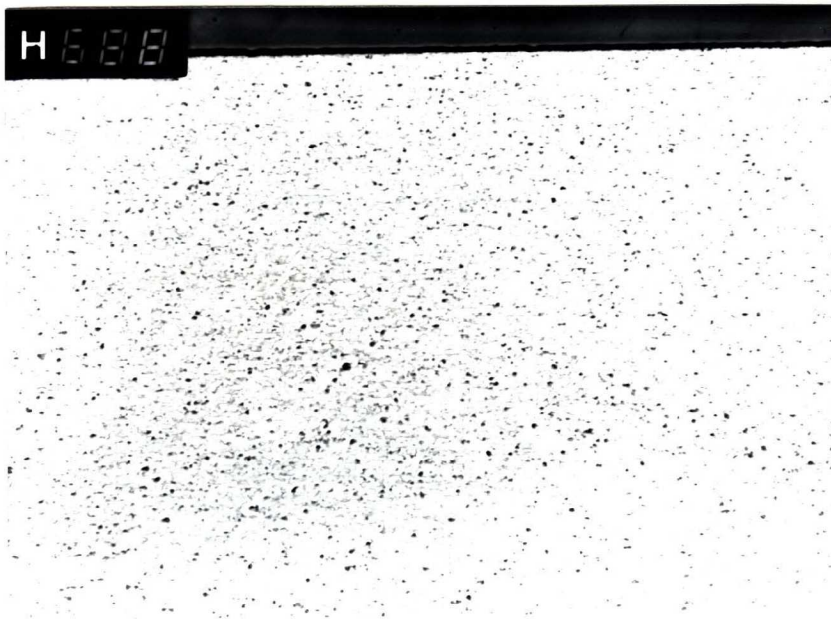


Abb.: 5 a
(Aufn.Nr.: H 688)
Gefüge quer zur Walzrichtung
mit intermetall. Phasen
(schwarze Punkte)
Ätzung: 5% MoO₃
V = 40 : 1



Abb.: 5 b
(Aufn.Nr.: H 687)
Gefüge längs zur Walz-
richtung mit intermetall.
Phasen (schwarze Punkte)
Ätzung: 5% MoO₃
V = 40 : 1



Abb.: 5 c
(Aufn.Nr.: H 691)
Verteilung der intermetall.
Phasen (Mg₂Si))
ungeätzt
V = 400 : 1

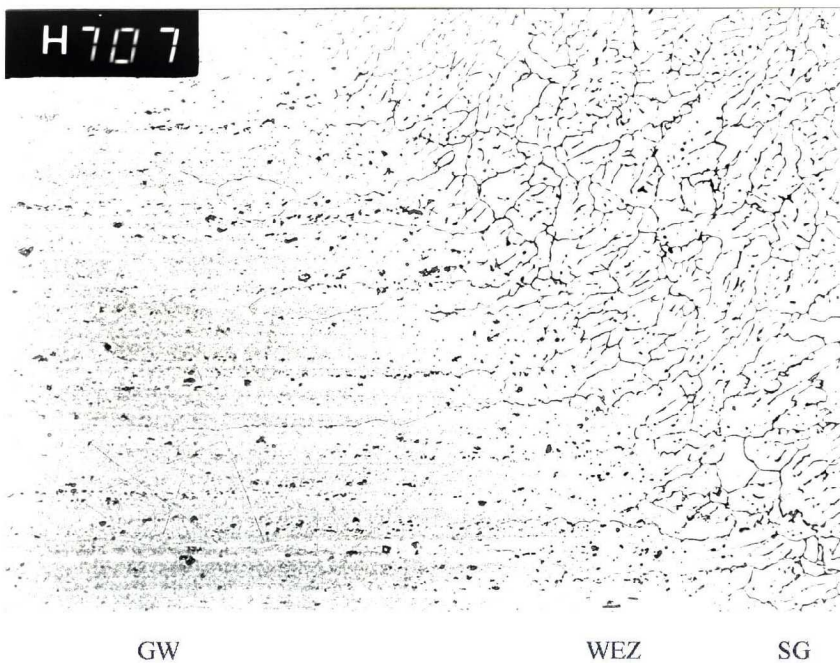


Abb.: 7 a
(Aufn.Nr.: H 707)
Übergang WEZ / Schweißnaht
mit Kennzeichnung des
Schweißgutes (SG), der
Wärmeeinflusszone (WEZ)
und des Grundwerkstoffes
(GW)
Ätzung: 5% MoO₃
V = 128 : 1

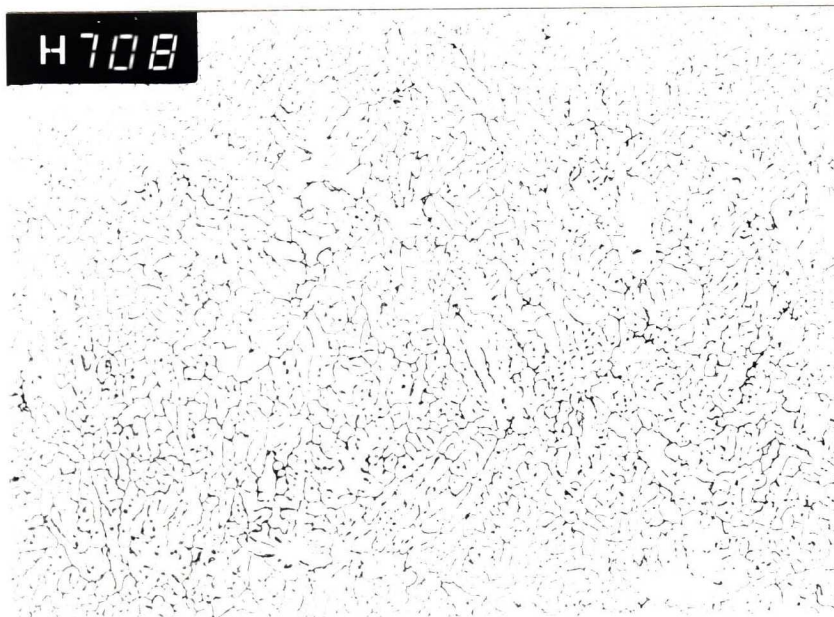


Abb.: 7 b
(Aufn.Nr.: H 708)
Dendritisches Gefüge in
Schweißnahtmitte
Ätzung: 5% MoO₃
V = 128 : 1

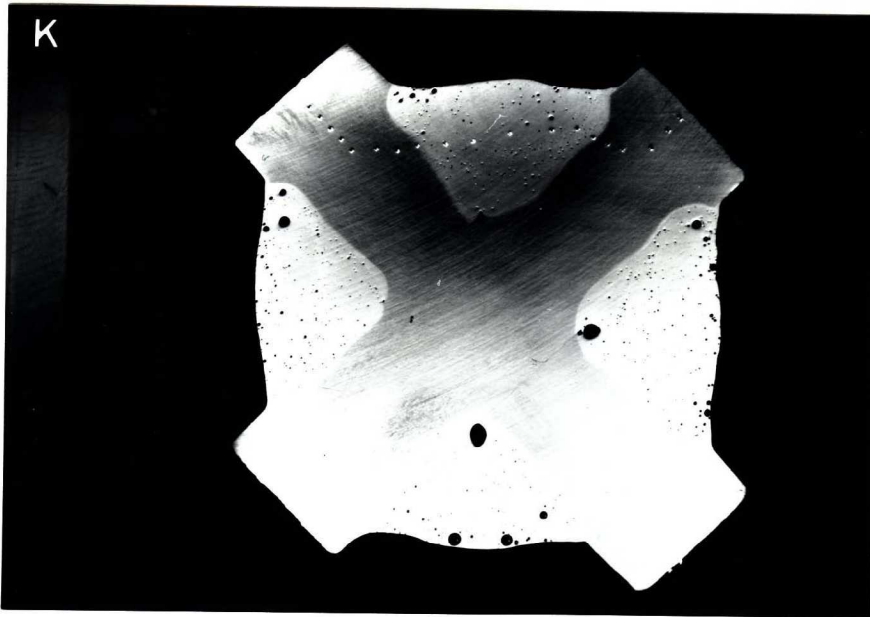


Abb.: 8
(Aufn.Nr.: K 033)
Übersichtsaufnahme
Schweißnaht: T - Mg - 1 mit
Härteeindrücken und Poren
(HV 1: s.Tab.2)
Ätzung: 5% MoO₃
V = 2 : 1

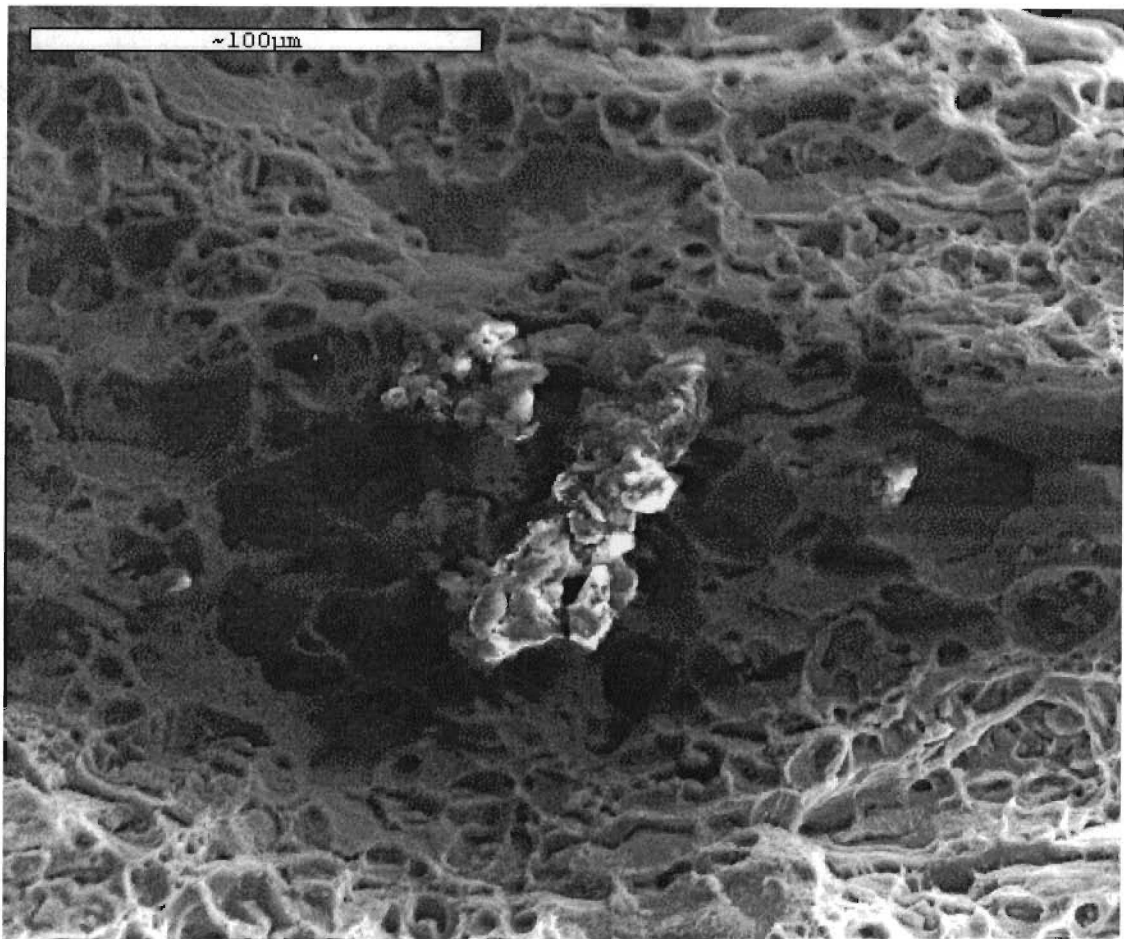
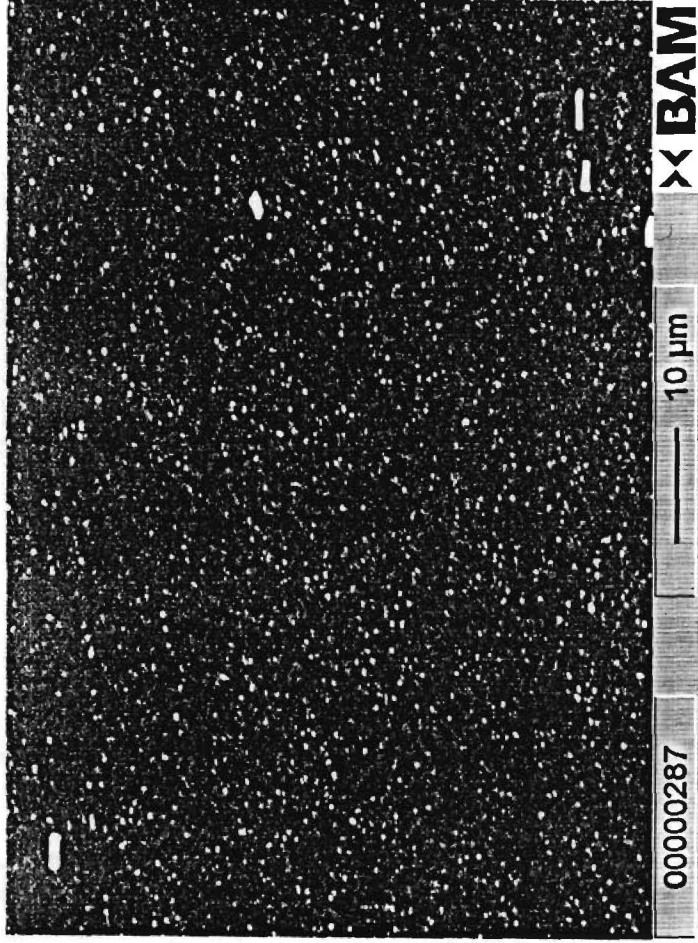


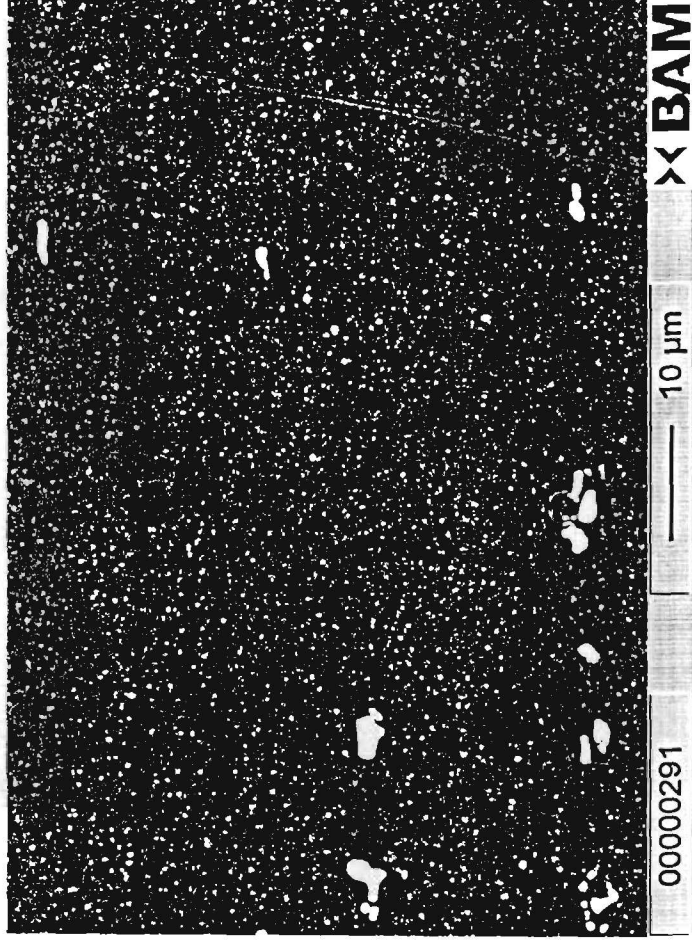
Abb.10: REM- Aufn., Bruchfläche einer Flachzugprobe, Einschlüsse (Ausscheidungen) im Bruch
Probe M2L



00000287

Signal : COMPO
 Acc : 12.0K
 Mag : X1,500
 Date : 300699
 Filmtitel : 287

Probe : AluMq2d
 Comment : Kl.Aus.63.9/41.0
 Operator : Meyer
 Projekt : KRAFKA
 Comment : Pr. MQ2

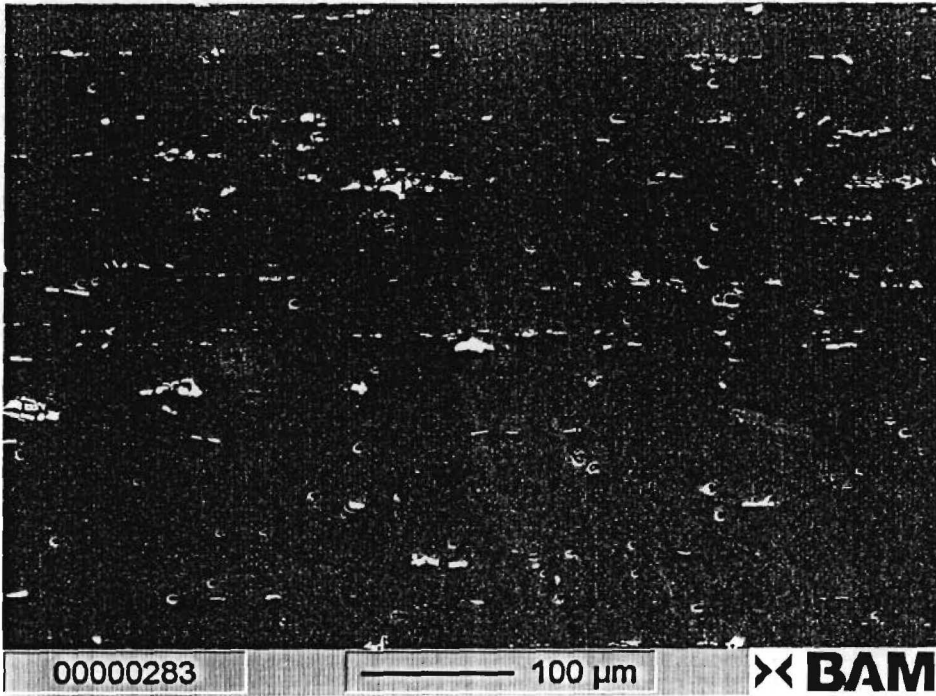


00000291

Signal : COMPO
 Acc : 12.0K
 Mag : X1,500
 Date : 300699
 Filmtitel : 291

Probe : AluTQ14d
 Comment : Alupr.TQ14
 Operator : Meyer
 Projekt : KRAFKA
 Comment : Pr. TQ14

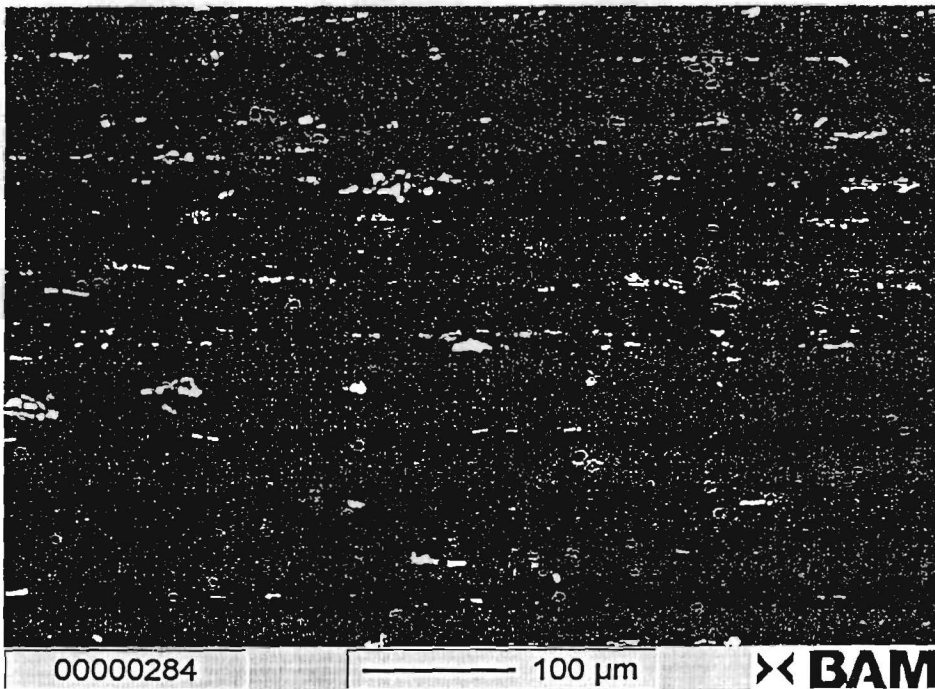
Abb.11a-b: Verteilung der intermetallischen Ausscheidungen der Proben MQ2 und TQ14, aufgenommen mit der Elektronenstrahlmikrosonde



00000283

Signal : SEI
Acc : 15.0K
Mag : X200
Date : 230699
Filmtitel : 283

Probe : AluMQ2a
Comment : AlMgSi
Operator : Meyer
Projekt : KRAFKA
Comment : Pr. MQ2

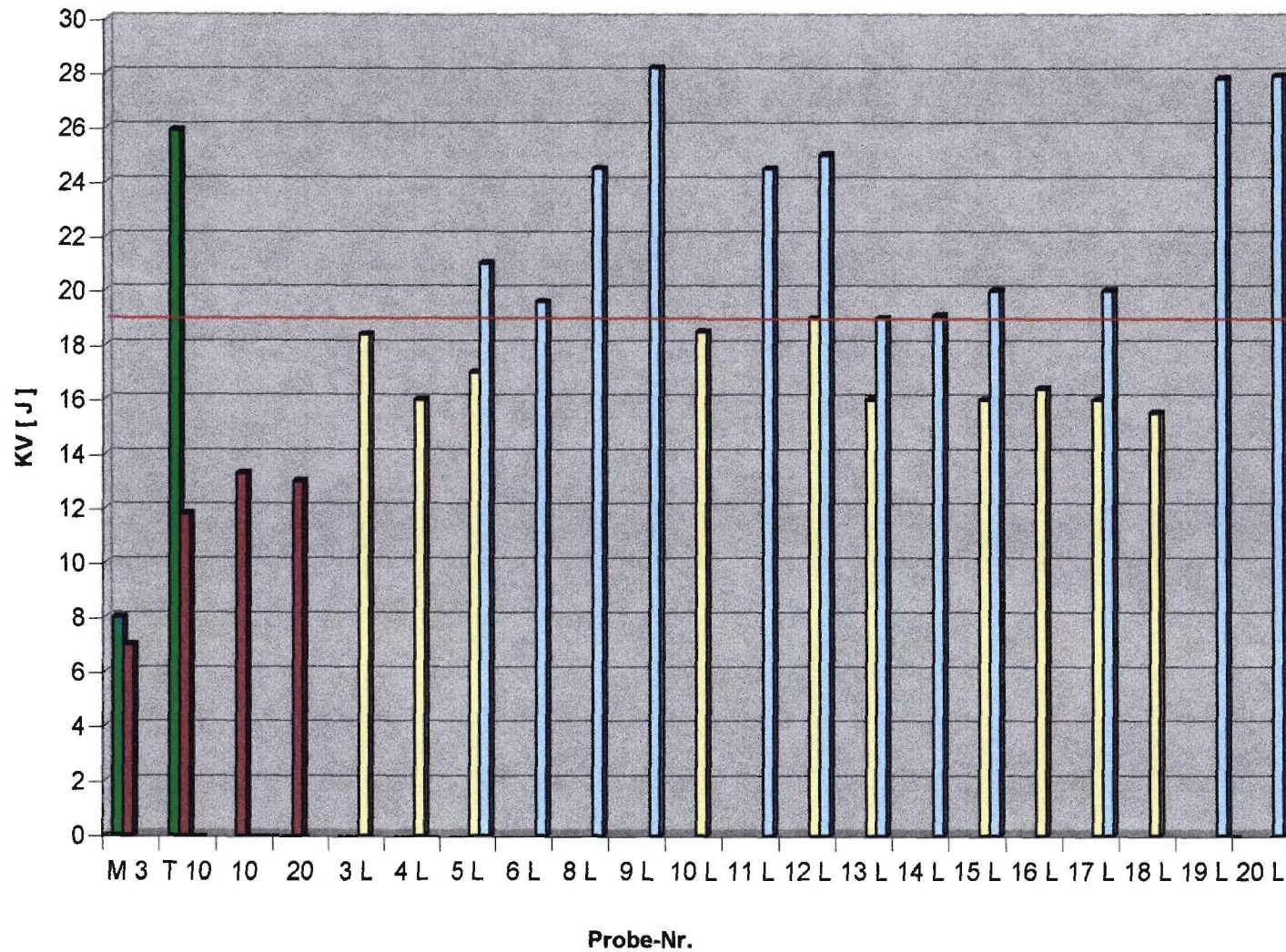


00000284

Signal : COMPO
Acc : 15.0K
Mag : X200
Date : 230699
Filmtitel : 284

Probe : AluMQ2b
Comment : AlMgSi
Operator : Meyer
Projekt : KRAFKA
Comment : Pr. MQ2

Abb. 11c-d: Verteilung der intermetallischen Ausscheidungen der Probe MQ2, aufgenommen mit der Elektronenstrahlmikrosonde



Kennzeichnung von Probenlage und Rissebene nach ASTM-E-399-81:

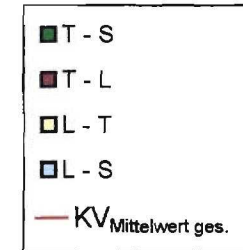
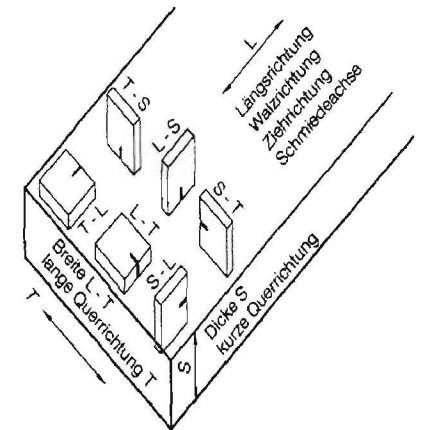


Abb.12: Kerbschlagarbeit (Mittelwerte) der 22 unterschiedlichen AlMgSi1 - Bleche (M 3 - 20 L), die bei Raumtemperatur an Längs- und Querproben mit unterschiedlicher Rissebene ermittelt wurde.

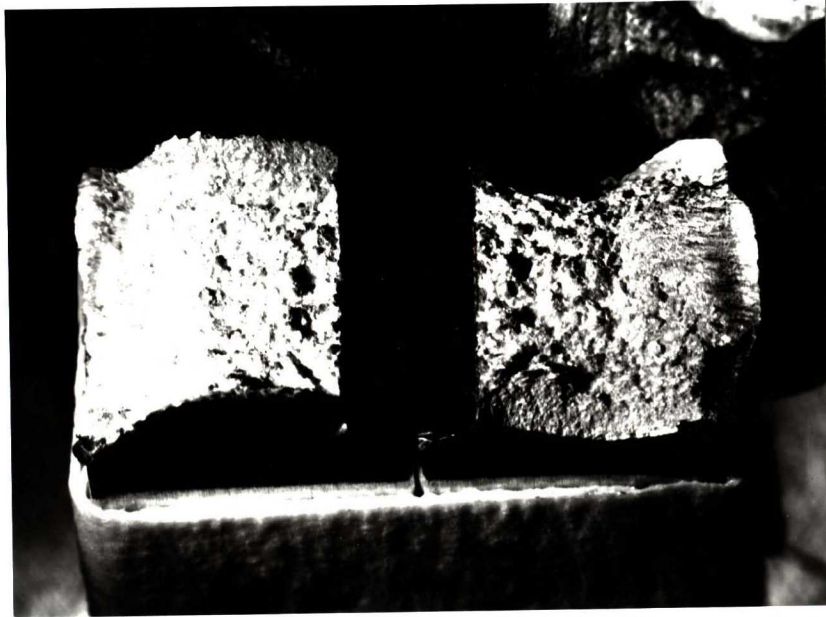


Abb.: 13 a Probe-Nr.: 4 L - 3 (L - T) 5 : 1
(Aufn.Nr.: K 049)

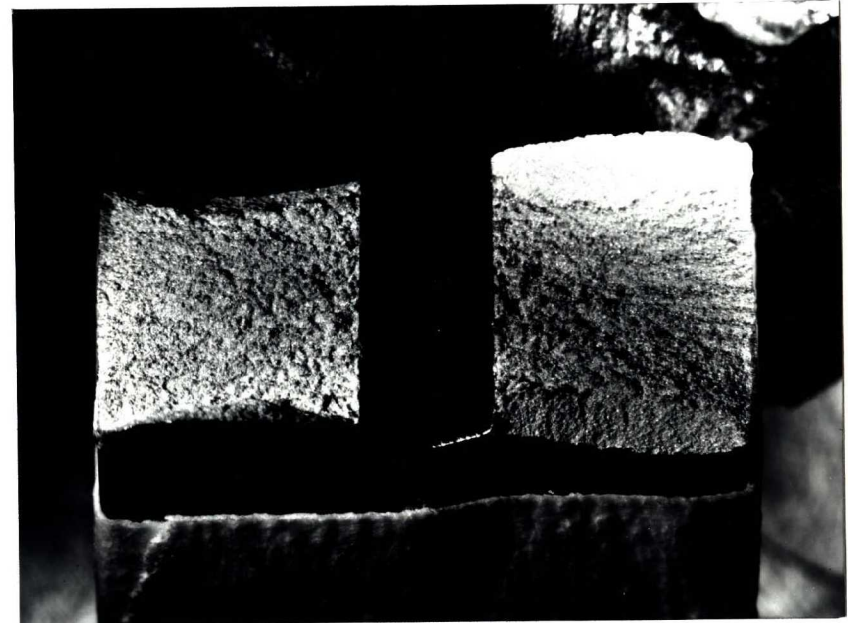


Abb.: 13 b Probe-Nr.: M 3 - 10 (T - L) 5 : 1
(Aufn.: Nr.: K 050)

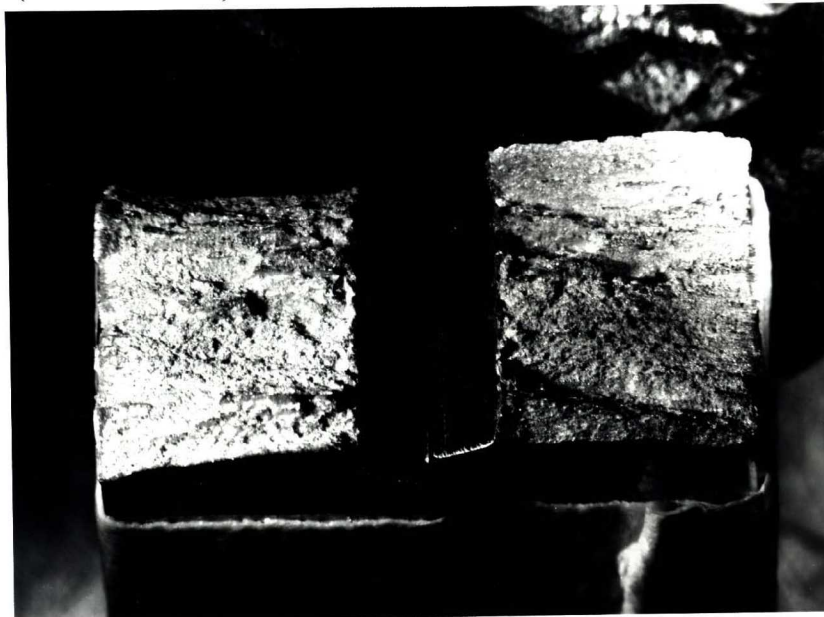


Abb.: 13 c Probe-Nr.: T 10 - 12 (T - L) 5 : 1
(Aufn.Nr.: K 051)

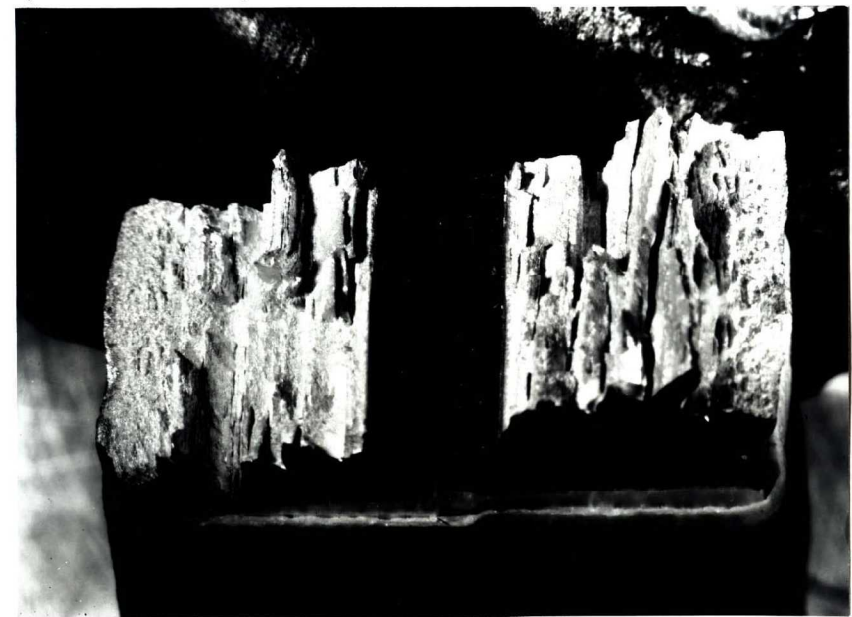


Abb.: 13 d Probe-Nr.: T 10 - 10 (T - S) 5 : 1
(Aufn.Nr.: K 052)

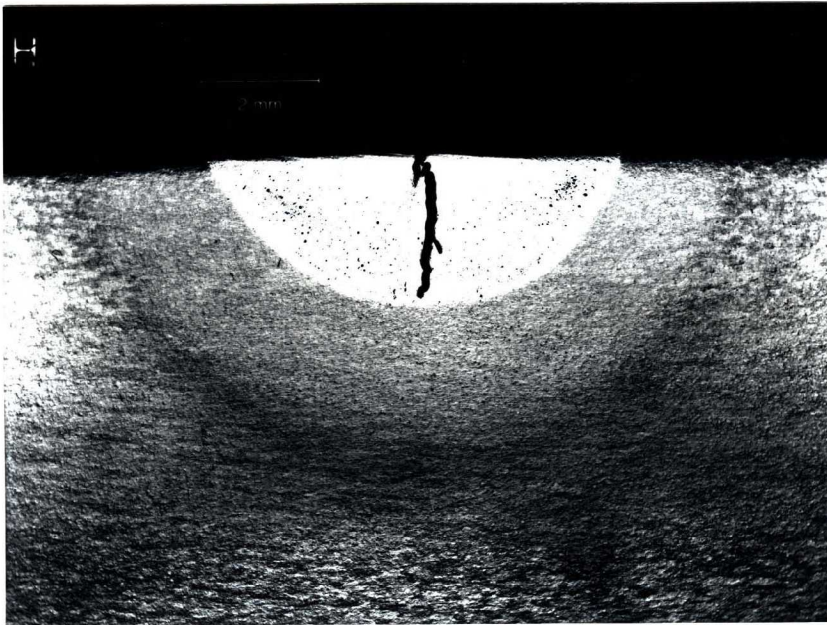


Abb.: 14 a
(Aufn.Nr.: H902)
Schweißnaht mit Mittelriss
nach MVT-Test mit 0,5 %
Biegung
Ätzung: 5% MoO₃
V = 8 : 1

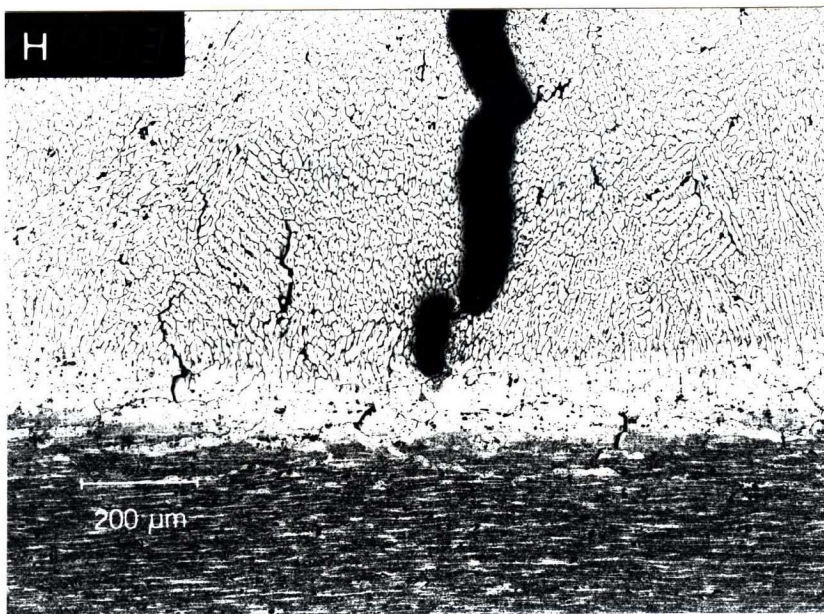


Abb.: 14 b
(Aufn.Nr.: H903)
Schweißgut-Wurzel / WEZ
Ätzung: 5% MoO₃
V = 80 : 1

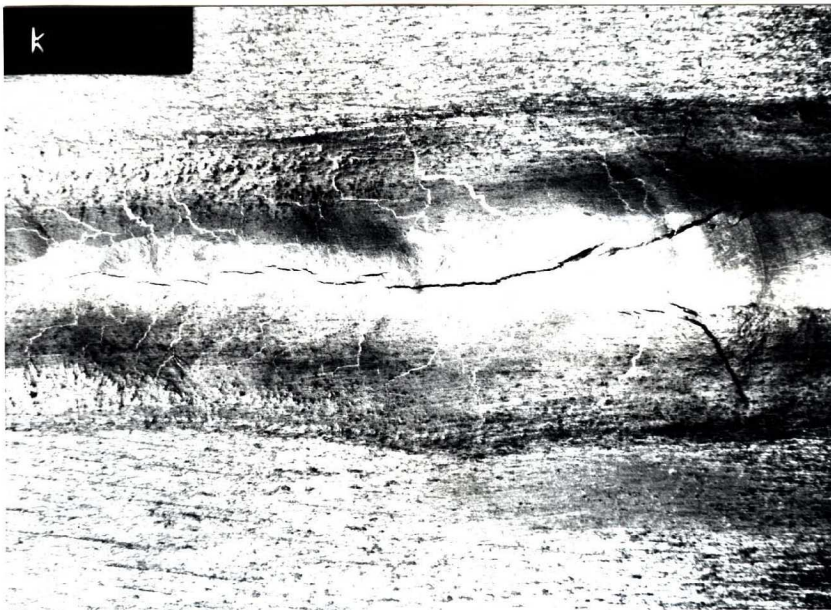


Abb.: 15 a
(Aufn.Nr.: K 007)
MVT-Probe mit Mittenriss
0,5 h bei 550°C gegläht, H₂O
abgeschreckt
Streckenenergie: 10,9 [kJ/cm]
Biegedehnung: 0,25 [%]
Ätzung: 5% MoO₃
V = 5 : 1

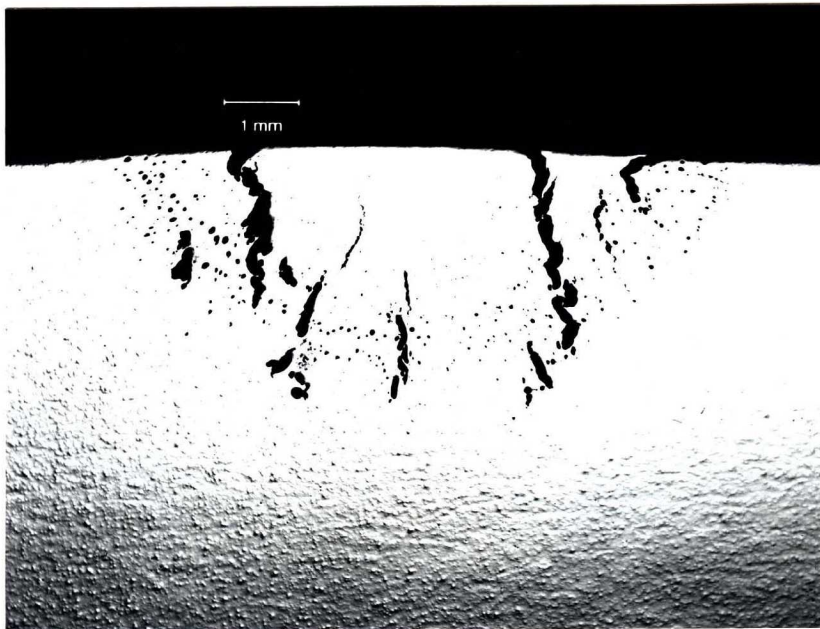


Abb.: 15 b
(Aufn.Nr.: K 008)
Querschliff durch WIG-
Aufschmelzraupe der MVT-
Probe
Ätzung: 5% MoO₃
V = 10 : 1

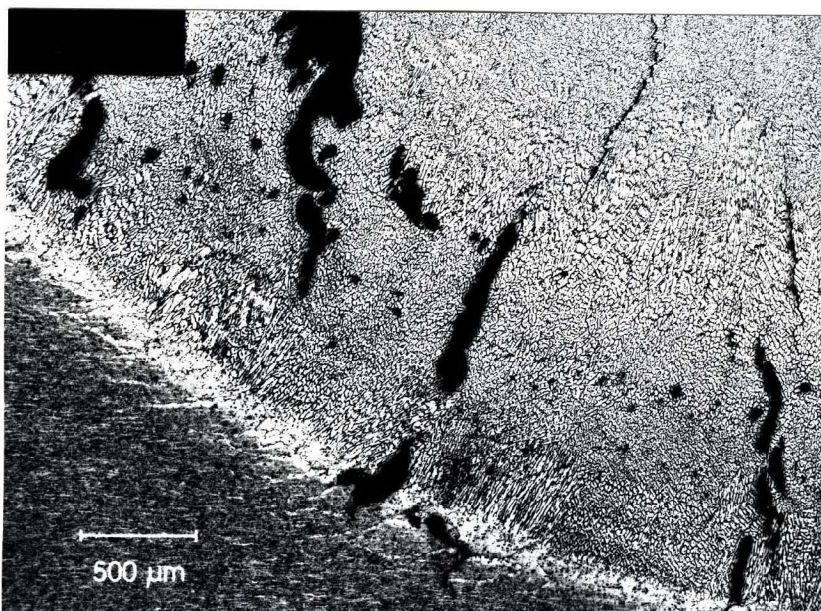


Abb.: 15 c
(Aufn.Nr.: K 009)
Erstarrungsrisse (ER) im
Schweißgut und
Wiederaufschmelzrisse
(WAR) in der WEZ
Ätzung: 5% MoO₃
V = 32 : 1

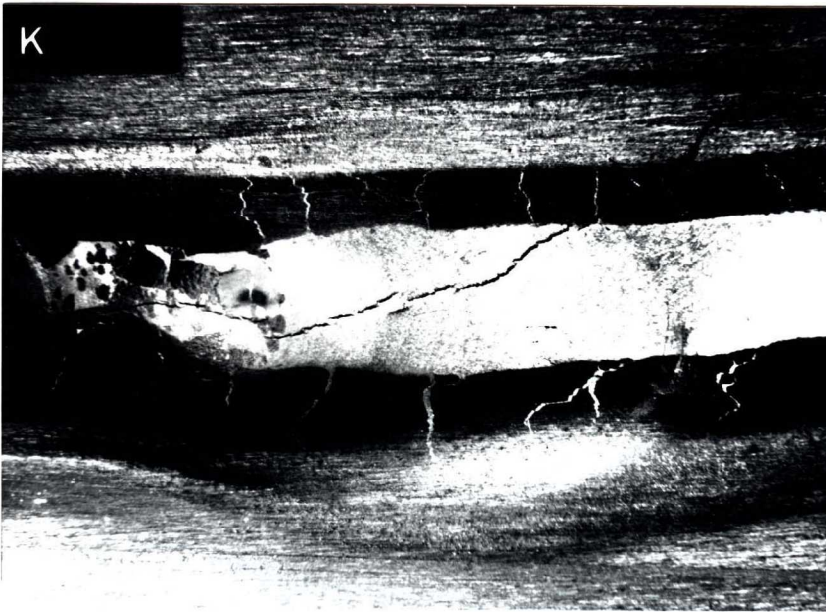


Abb.: 16 a
(Aufn.Nr.: K 056)
MVT-Probe mit Riss in
Schweißnahtmitte und
Grundwerkstoff
ungeätzt
V = 5 : 1

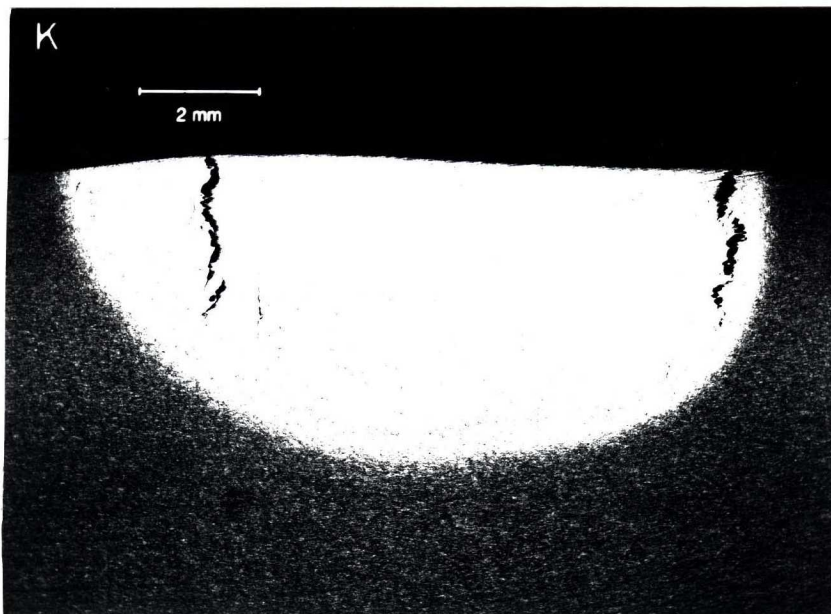


Abb.: 16 b
(Aufn.Nr.: K 058)
Querschliff durch WIG-
Aufschmelzraupe der MVT-
Probe
Ätzung: 5% MoO₃
V = 8 : 1

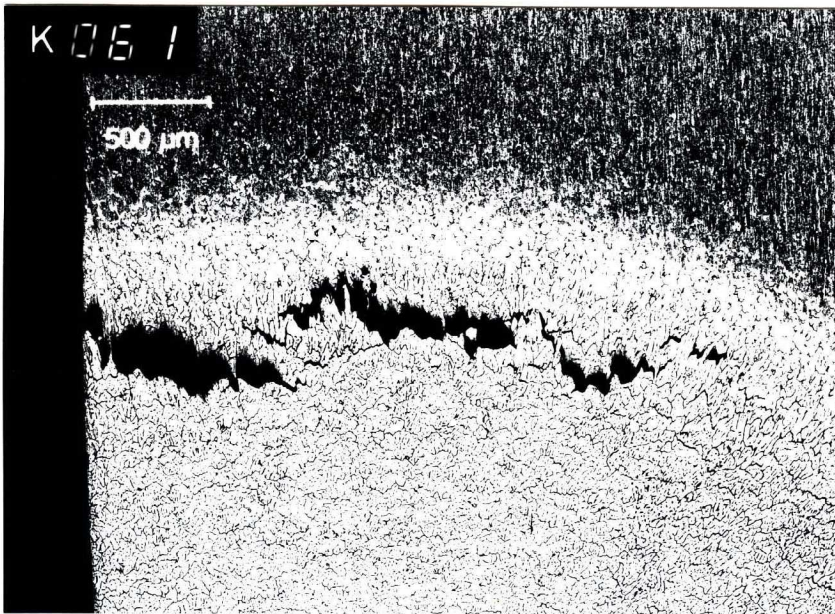


Abb.: 16 c
(Aufn.Nr.: K 061)
Übergang Schweißnaht zur
Wärmeeinflußzone mit Rissen
Ätzung: 5% MoO₃
V = 32 : 1



Abb.: 16 d
(Aufn.Nr.: K 062)
Erstarrungsrisse (ER) im
Schweißgut
Ätzung: 5% MoO₃
V = 32 : 1

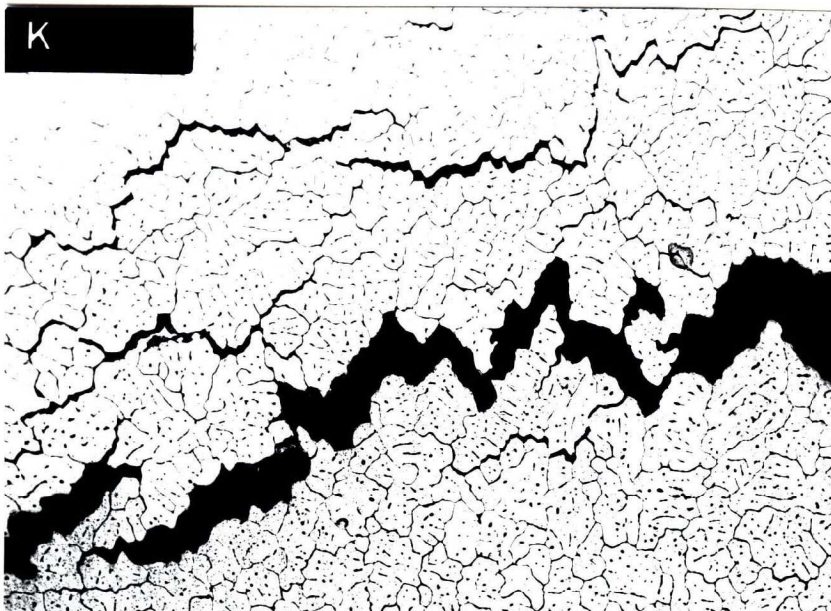


Abb.: 16 e
(Aufn.Nr.: K 063)
Erstarrungsrisse (ER) im
Schweißgut (Detail aus
Aufn.Nr.: K 062)
Ätzung: 5% MoO₃
V = 128 : 1

Probe: T 6 Q



Abb.: 17 a
(Aufn.Nr.: K 057)
MVT-Probe mit Mittenriss
ungeätzt
V = 5 : 1

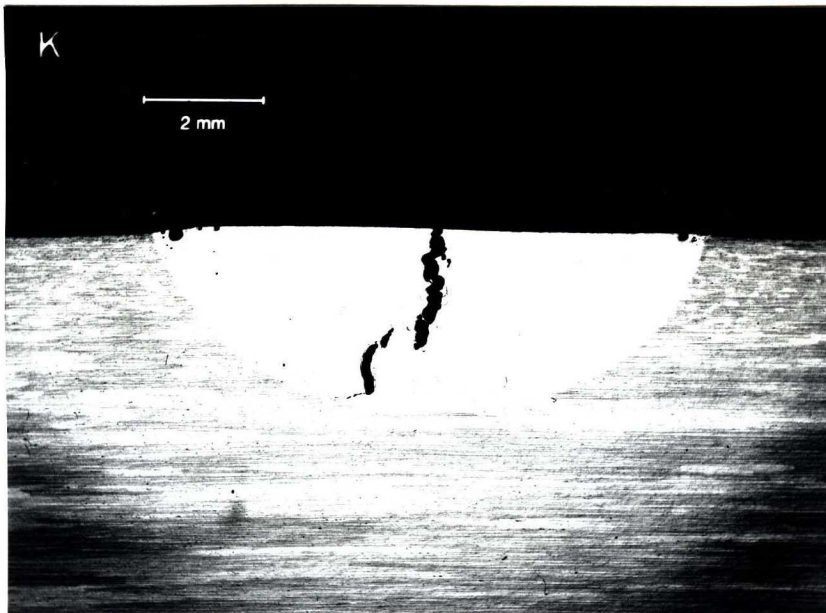


Abb.: 17 b
(Aufn.Nr.: K 059)
Querschliff durch WIG-
Aufschmelzraupe der MVT-
Probe
Ätzung: 5% MoO₃
V = 8 : 1

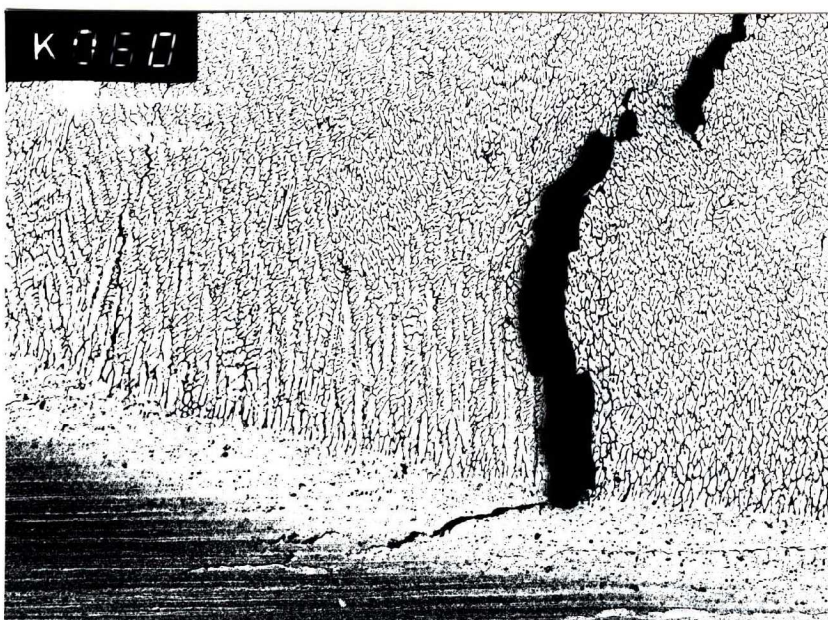


Abb.: 17 c
(Aufn.Nr.: K 060)
Erstarrungsrisse (ER) im
Schweißgut und
Wiederaufschmelzrisse
(WAR) in der WEZ
Ätzung: 5% MoO₃
V = 64 : 1