

Aluminium - Schweissverbindungen.

Untersuchungen an
Schweissverbindungen von
Aluminiumlegierungen des konstruktiven
Ingenieurbaues unter vorwiegend
ruhender Beanspruchung.

F 1695

F 1695

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen -BMVBW- geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

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.

© by Fraunhofer IRB Verlag

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 irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de



II.12660/We/kü

SCHLUSSBERICHT

zum Forschungsvorhaben B II 5 - 80 01 74 - 51 des
Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau

"ALUMINIUM-SCHWEISSVERBINDUNGEN"

Untersuchungen an Schweißverbindungen von Aluminium-
legierungen des konstruktiven Ingenieurbauwesens unter
vorwiegend ruhender Beanspruchung

G. Werner

Abschluß: Oktober 1980

Der Bundesminister für Wohnungsbau

Abschluß-Zwischen-Bericht
zum Forschungs-Auftrag

Az.: B15-80 01 74-51 Eing.: 5.11.80

Sammlung der
Forschungsberichte
des Referats B15 Nr. 1695

<u>Inhaltsverzeichnis</u>	Seite
Einleitung und Einteilung des Gesamtvorhabens	1
I. Teil GZ (Grundwerkstoff, Zusatzwerkstoff) - Problemstellung und Zielsetzung	2
<u>1.</u> Vorversuche, Eignungsuntersuchungen	3
<u>2.</u> Versuchsprogramm, Materialwahl und Probenherstellung	4
2.1 Werkstoffe	5
2.2 Herstellung der Schweißproben	5
2.3 Herstellung der Versuchsstücke	6
<u>3.</u> Durchführung der experimentellen Untersuchungen GZ	7
3.1 Untersuchungen der Grundmaterialien	7
3.2 Untersuchungen an Stumpfschweißungen	7
3.3 Untersuchungen an Kehlnahtschweißungen	8
3.3.1 Stirnkehlnahtverbindungen	8
3.3.2 Flankenkehlnahtverbindungen	9
<u>4.</u> Auswertung der Versuchsergebnisse	10
4.1 Beurteilungskriterien	11
4.2 Bewertung der Stumpfschweißungen	13
4.3 Bewertung der Kehlnahtschweißungen	14
4.3.1 Stirnkehlnahtverbindungen	14
4.3.2 Flankennahtverbindungen	16
4.3.3 Zusammenfassende Bewertung	18
<u>5.</u> Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse und Berechnungsvorschläge	23
<u>6.</u> Zusammenfassung Teil GZ	27
II. Teil W (Wärmeeinflußzone) - Tragfähigkeitserhöhung von Aluminium-Schweißverbindungen	30
Vorversuche und ergänzende Erläuterungen	30
Problemstellung und Zielsetzung - Verbesserung der Tragfähigkeit	32
Versuchsprogramm, Materialwahl und Probenherstellung	32
Experimentelle Ermittlung der Tragfähigkeit- Versuche	32
-Ergebnisse	33
Rechnerische Ermittlung der Tragfähigkeit	34
Schlußfolgerungen und Ausblick - Zusammenfassung	36
III. Schlußbemerkungen	37
Literaturhinweise	L1/L2
Beilagen 1 bis 28	B1 - B28

Einleitung und Einteilung des Gesamtvorhabens

Zum Zeitpunkt der ersten Antragstellung im Jahre 1973 war die Verwendung von Aluminiumlegierungen für geschweißte tragende Konstruktionen unter vorwiegend ruhender Belastung beträchtlich erschwert, da verbindliche - dem Stand der Technik entsprechende - Berechnungsvorschriften fehlten. Die im Entwurf vorbereitete DIN 4113 enthielt in Teil 2 eine Reihe von nicht ausreichend abgesicherten Angaben über die zulässigen Beanspruchungen geschweißter Verbindungen bei Verwendung der unterschiedlichen Grund- und Zusatzwerkstoffe - eine weitere zu untersuchende Fragestellung ergab sich aus der durch den Schweißprozeß in Teilbereichen auftretenden Entfestigung bestimmter Grundmaterialien, d.h. der realistischen Beurteilung der aus diesem Effekt resultierenden Beeinträchtigung der Tragfähigkeit von Baugliedern.

Wegen dieser beiden recht unterschiedlichen Problemstellungen wurde das Gesamtvorhaben in die beiden Teilprogramme

GZ	Grundwerkstoff - Zusatzwerkstoff
W	Wärmeeinflußzone

gegliedert.

Im Teil GZ sollte auf der Grundlage von Ergebnissen gezielter experimenteller Untersuchungen an Grundwerkstoff-Zusatzwerkstoff-Kombinationen ein allgemeingültiges, einfaches Konzept zur Berechnung und Dimensionierung von Schweißverbindungen erarbeitet werden, das auch ein Einbeziehen weiterer oder neuentwickelter Legierungen ermöglicht. Hauptaufgabe war es, durch übersichtliche Modelle die im Versuch erkennbaren Beziehungen und Einflußparameter nachvollziehbar in Berechnungsansätze so einzubauen, daß ein Bezug der zulässigen Beanspruchungen zu den tatsächlich erreichbaren Traglasten hergestellt ist.

Im Teil W war der Einfluß der Nahtanordnung auf die Tragfähigkeit durch Schweißverbindungen gestoßener Bauteile zu untersuchen und damit die Möglichkeit einer Tragfähigkeitserhöhung durch konstruktive Maßnahmen. Auch hier galt es, auf der Grundlage der Versuchsergebnisse ein zutreffendes Rechenmodell zu entwickeln und brauchbare Dimensionierungsvorschläge zu erarbeiten.

Die im folgenden geschilderten Überlegungen wurden zwar im wesentlichen in den mit der Ausarbeitung der DIN 4113 befaßten Arbeitsausschuß eingebracht, blieben aber bei der Abfassung größtenteils unberücksichtigt. Der im Mai 1980 erschienene Gelbdruck /1/ des Blattes 2 dieser Vorschrift läßt die Frage offen, ob - mit Rücksicht auf die erweiterte Palette der für Konstruktionsteile vorgesehenen Grundwerkstoffe /2/ und auf die erhebliche Differenzierung bezüglich der Festigkeitsklassen - das zur Berechnung gewählte Schema ausreichend flexibel gehandhabt werden kann.

I. Teil GZ (Grundwerkstoff-Zusatzwerkstoff), Problemstellung und Zielsetzung

Im konstruktiven Ingenieurbau nimmt das Aluminium einen relativ geringen Raum ein - folgende Legierungen nach DIN 1725 sind in DIN 4113 aufgenommen als Grundwerkstoff:

selbstwiederaushärtende Legierungen:	ALZn4,5Mg1	F34/35
aushärtbare Legierungen:	AlMgSi1	F28/32
	AlMgSi0,5	F22
nicht aushärtbare Legierungen:	AlMg4,5Mn	F27,W28,G31
	AlMg3	} W18/19,F18/25
	AlMg2Mn0,8	

sowie als Zusatzwerkstoffe (nach DIN 1732)

S-AlMg3
S-AlMg5
S-AlMg4,5Mn
S-AlSi5

Alle anderen Legierungen dürfen nur aufgrund einer bauaufsichtlichen Zulassung verwendet werden, wobei die zulässigen Beanspruchungen im Einzelfall festzulegen sind.

Bei Schweißverbindungen von Werkstoffen mit unterschiedlichen Festigkeitseigenschaften sollte sich die Höhe der zulässigen Schnittgrößen nach der tatsächlich erreichbaren Tragfähigkeit richten, wobei neben den Werkstoffkenngrößen insbesondere die Nahtart, -anordnung und -form, sowie die Ausführung eine entscheidende Rolle spielen.

Geht man einer entsprechenden Lösung des Problems allerdings dadurch aus dem Weg, daß bei Werkstoffkombinationen die jeweils niedrigsten Werte - zudem ohne Rücksicht auf den Zusatzwerkstoff nach Maßgabe der 0,2-Grenze der WEZ vereinbart - gelten, wie dies in Tabelle 4b DIN 4113, Teil 2 vorgesehen ist, so muß man wegen der - insbesondere bei Kehlnahtverbindungen - sehr unterschiedlichen Sicherheitsspannen damit rechnen, daß trotz Einführung der Norm über den Weg einer Zulassung oder Zustimmung höhere zulässige Beanspruchungen bei durch diese Regelung benachteiligten Konstruktionen angestrebt werden. Das hier geschilderte Vorhaben sollte einen Beitrag zur übersichtlicheren und vereinfachenden Behandlung des Problems leisten, wobei in Vorversuchen und Eignungsuntersuchungen die Aussicht auf Erfolg vorab zu klären war.

1. Vorversuche, Eignungsuntersuchungen

Bevor das Hauptversuchsprogramm in Angriff genommen wurde, dienten für Zulassungsuntersuchungen vorgesehene Proben zur Klärung der Probenformeignung: während die Verwendbarkeit einer vereinfachten Probe zur Untersuchung von Flankenkehlnähten bereits nachgewiesen wurde /3/, sind bei den für Stirnnahtuntersuchungen üblichen Kreuzproben 4 Kehlnähte zu schweißen, obwohl nur zwei Nähte in die Ermittlung der Bruchfestigkeit eingehen. Nahezu 100 Untersuchungen führten zu dem Ergebnis, daß die T-förmigen Reststücke einseitig zerstörter Kreuzproben für einen weiteren Versuch in Schulterlagerung verwendet werden können, wobei keine Beeinflussung des Ergebnisses ("Festigkeit") zu erwarten ist. Die Vorschläge geeigneter Probenformen sind in die entsprechenden IIW-Empfehlungen /4/ eingearbeitet worden.

Die grundsätzliche Fragestellung, ob die nur nach dem Grundwerkstoff differenzierende Festlegung zulässiger Beanspruchungen bei Kehlnähten sinnvoll ist, beantwortete ein Pilotversuchsprogramm zumindest nicht bestätigend: Vergleichsuntersuchungen an mit dem gleichen Zusatz geschweißten Kreuzproben (Stirnkehlnähten) ergaben:

Zusatzwerkstoff	Grundwerkstoff	mech. Kennwerte (N/mm ²)		Kehlnahtfestigkeit			zulässig nach DIN 4113 N/mm ²	Sicherheitsquotient Sp.7/Sp.8
		Rp _{0,2}	Rm	Anz.	Einzelwert min max	Mittelwert N/mm ²		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
S-ALMg5 (5356)	AlMg3	78	185	20	171 216	198	36	5,50
	AlMg5	198	299	22	190 245	218	(54)	4,04
	AlZn4,5Mg1	314	360	24	176 247	205	72	2,85

Die "Kennwertprofile" der zugehörigen Stumpfschweißungen sind auf Bild 9 und 10 (Nr. 3,6,9) dargestellt. Die Ergebnisse rechtfertigen in diesem Fall jedenfalls nicht ein Verhältnis der zulässigen Beanspruchungen

$$\text{AlMg3} : \text{AlMg5} : \text{AlZn4,5Mg1} = 1 : 1,50 : 2,00,$$

wenn die erreichten Tragfähigkeiten nahezu gleich hoch sind. Ähnliche Ergebnisse aus früheren Versuchsreihen /5/ hatten zu dem hier beschriebenen Vorhaben ermutigt.

2. Versuchsprogramm, Materialwahl, Probenherstellung

Aufgrund der im Verlauf ähnlicher Versuchsreihen gesammelten Erfahrungen wurden für die experimentellen Untersuchungen zur Bewertung der Einflußgrößen

- Grundwerkstoff-Zusatzwerkstoff-Kombination
- Ausbildung der Verbindung
- Beanspruchungsart der Verbindung

auf die Tragfähigkeit geschweißter Verbindungen 3 Aluminiumlegierungen (je eine der Haupttypen selbstaushärtend - aushärtbar - nicht aushärtbar) und die 4 eingeführten Zusatzwerkstoffe gewählt und als Nahtformen Stumpf- und Kehlnähte geschweißt. Zur Prüfung quer- und längsbeanspruchter Kehlnähte kamen teilweise neuentwickelte Probenformen zum Einsatz /4/. Die Stumpfnahtversuche sollten zur Ermittlung von Vergleichswerten dienen und über die Lage der kritischen Zone Auskunft geben. Von den jeweils möglichen Kombinationen wurde eine gezielte Auswahl untersucht, bei den

Kehlnahtverbindungen von $\left[3 + \binom{3}{2} \right] \cdot 4 = 24$ Möglichkeiten 15
Stumpfnahtverbindungen von $3 \cdot 4 = 12$ Möglichkeiten 9,

wobei bei der Zuordnung auch auf Tabelle 2 der DIN 4113 (Teil 2) Rücksichtgenommen wurde und bei den Stumpfverbindungen aus einleuchtenden Gründen jeweils nur Bleche gleichen Materials gefügt wurden.

2.1 Werkstoffe

Als Ausgangsmaterial wurden 8 mm dicke Bleche der in Tabelle 1 aufgeführten Legierungen verwendet, die mechanischen Kennwerte und chemischen Analysenwerte entsprechen den Anforderungen der Richtlinien (DIN 1715, 1725). Die Zusatzwerkstoffe sind in Tabelle 2 angegeben, die nach DIN 1732 an Stumpfverbindungen gestellten Festigkeitsanforderungen sind erfüllt, die vom Hersteller angegebenen Legierungsrichtwerte korrespondieren ausreichend mit dieser Norm. Die im folgenden gewählten Kurzbezeichnungen für die Werkstoffe (Grundwerkstoffe A, B, F - Zusatzwerkstoffe 1,2,3,4) sind in den Tabellen erläutert.

2.2 Herstellung der Schweißproben

Die Herstellung der Schweißproben, die erst Sept./Okt. 1976 erfolgen konnte, wurde von der ausführenden Firma auf den in Bild 1 als Muster dargestellten Formblättern protokolliert. In den Tabellen 4, 5 und 6 sind die wesentlichen Daten zusammengestellt. Während bei den Stumpf- und Stirrnahtverbindungen nahezu gleiche Parameter für alle Probengruppen gewählt wurden, kamen zur Fertigung der Flankennähte Elektroden unterschiedlicher

Durchmesser zum Einsatz, wobei Schweißprozeß, Stromstärke und Spannung abweichend gewählt wurden. Insgesamt wurden folgende Proben geschweißt:

9 Stumpfnahntverbindungen	A2, A3, B1, B2, B3, B4, F1, F2, F3
24 Stirnkehlnahntverbindungen	} BB1, FF1, AF1 - AA2, BB2, FF2, AB2, AF2 -
2x24 = 48 Flankenkehlnahntverbind.	

2.3 Herstellung der Versuchsstücke

Die Trennung der Schweißproben und die mechanische Bearbeitung der einzelnen Versuchsstücke erfolgte in der FMFA Stuttgart entsprechend den Bildern 2 bis 4:

- Stumpfnahntverbindung (Bild 2) - Herstellung von jeweils
3 Flachproben (Nr. 1 bis 3) b = 50 mm
1 Flachprobe (Nr. 4) b = 12 mm

zur Beurteilung der Festigkeit der Verbindung (Naht, Übergang, WEZ) ohne (bzw. mit) Feindehnungsmessungen. Bei den Proben 2 und 4 wurde die Nahtüberhöhung mechanisch abgearbeitet. Die Reststücke sind für dynamische Untersuchungen vorgesehen.

- Stirnkehlnahntverbindung (Bild 3) - Herstellung von jeweils
3 Kreuzproben (Nr. 1 bis 3) b = 50 mm mit 3 Nähten
5 Kreuzproben (Nr. 4 bis 8) b = 50 mm mit 4 Nähten

zur Ermittlung der Festigkeit querbeanspruchter Einzel- und Doppelkehlnähte

- Flankenkehlnahntverbindung (Bild 4) - Herstellung von jeweils
2x2 Sonderproben (Nr. 1 bis 4) entsprechend /3,4/
zur Ermittlung der Schubfestigkeit längsbeanspruchter Kehl­nähte

3. Durchführung der experimentellen Untersuchungen GZ

An den nach Abschnitt 2.3 gefertigten Versuchsstücken und den Zugproben der Grundmaterialien wurden insgesamt 276 Einzelzugversuche durchgeführt. Zur Ermittlung der mechanischen Kennwerte der Grundmaterialien und der Stumpfnahthproben Nr. 4 erfolgten an 27 Versuchsstücken Feindehnungsmessungen (Bestimmung von $R_{p0,2}$ und E) und Messungen zur Bestimmung der Bruchdehnung A5 (DIN 50145), während bei den übrigen Untersuchungen die zügige Beanspruchung ohne weitergehende Messung bis zum Bruch (Höchstlast F_m) gesteigert wurde.

Zur Ermittlung der rechnerischen Bruchfestigkeit der Kehlnahthverbindungen wurden die erforderlichen Bezugsflächen sowohl vor dem Versuch (a - Maß durch Außenmessung) als auch an den zerstörten Proben (Bruchquerschnitt a^*) durch Messung bestimmt. Diese Vorgehensweise hat sich bei früheren Untersuchungen /3,4,5/ zur Einengung des Streubereiches und zur besseren Bewertbarkeit bewährt /6/.

Weiterhin wurde das äußere Erscheinungsbild der Proben sowie Lage und Aussehen der Bruchflächen (Neigung, Einbrand, Poren, Bindefehler usw.) in entsprechenden Protokollen festgehalten.

3.1 Untersuchungen der Grundmaterialien

Die in Tabelle 1 angegebenen mechanischen Kennwerte sind jeweils Mittelwerte, die Ergebnisse der 18 Einzelversuche sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Die Werkstoffe zeigten in Längs- und Querrichtung nahezu gleiche mechanische Eigenschaften, die auch den Anforderungen der DIN 1715 genügen.

3.2 Untersuchungen an Stumpfschweißungen

In Tabelle 7 sind die Ergebnisse der 36 Einzeluntersuchungen für die 9 Werkstoffkombinationen zusammengestellt. Die nach DIN 1732 Teil 2 Tab.2 an Stumpfschweißungen gestellten Anforderungen (Zugfestigkeit) sind erfüllt.

3.3 Untersuchungen an Kehlnahtschweißungen

Zur Ermittlung der Festigkeit von Kehlnahtschweißungen wurden die beiden Varianten

- Beanspruchung senkrecht zur Nahtichtung ($\sigma_{\perp}/\tau_{\perp}$ Stirnkehlnaht)
- Beanspruchung parallel zur Nahtichtung (τ_{\parallel} Flankenkehlnaht)

untersucht.

3.3.1 Stirnkehlnahtverbindungen

In 162 Einzelversuchen wurden $69 + 24 = 93$ Kreuzproben bis zum Bruch belastet, wobei die nach dem ersten Zerreiversuch verbliebenen T-förmigen Reststücke von 69 Proben in Schulterlagerung /4/ einem zweiten Belastungsgang unterworfen wurden. Dies betrifft vor allem die 45 Proben Nr. 1 bis 3 (Bild 3), bei denen nach Prüfung der Einzelnaht die gegenüberliegende Doppelnahhtverbindung bis zum Bruch belastet wurde. Die Zulässigkeit dieses Vorgehens wurde durch die Vorversuche (Abschn. 1) nachgewiesen und ist durch die in den Tabellen 10 bis 13 zusammengestellten Untersuchungsergebnisse und weitere Versuchsreihen /7/ bestätigt.

Die vor Durchführung der Versuche ermittelten Nahtdicken a überschritten teilweise so erheblich den Sollwert 4 mm (Meßwerte bis 6,8 mm!), daß bei einigen Proben der Bruch unplanmäßig im Blech erfolgte oder bei Schulterlagerung das Querblech abgeschert wurde. Bei den gekennzeichneten Proben wurde deshalb die Nahtdicke auf ein Sollmaß von 4,5 mm mechanisch abgearbeitet, um den Bruch im Nahtquerschnitt zu erzwingen. Eine auf diese Maßnahme zurückzuführende Beeinflussung der Endfestigkeit konnte aus den Ergebnissen nicht gefolgert werden.

Bei den 45 Einzelnahtuntersuchungen (Tab. 9) wurde wegen der unsymmetrischen Nahtanordnung die Bruchlage durch erheblich höhere Spannungskonzentrationen an der Nahtwurzel beeinflusst. Die V-förmig abgeknickte Bruchfläche beweist, daß der Bruch durch Normalspannungen eingeleitet wird (0°), aber der Restquerschnitt durch einen geneigten Schubbruch zerstört wird (Trenn-

bruch mit Scherlippe). Auf diesen Bruchmechanismus wird in Abschnitt 4.3.3 ausführlich eingegangen.

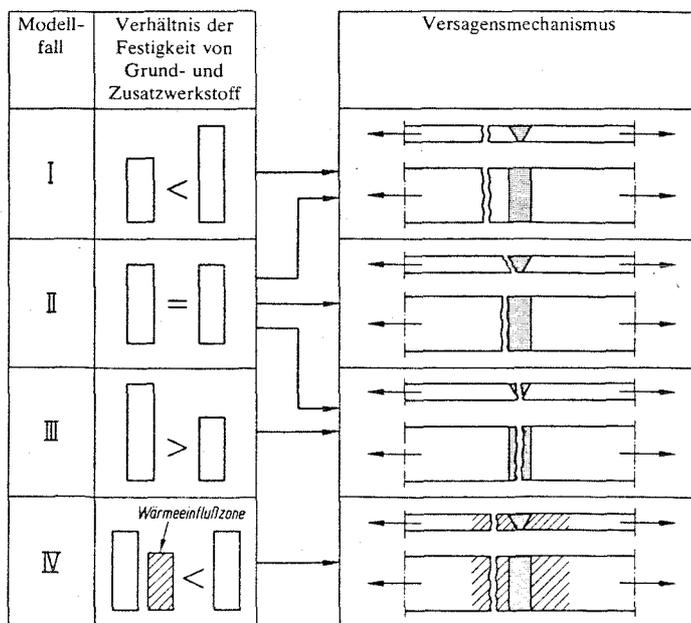
Bei den über hundert geprüften Doppelnahtverbindungen erfolgte die Mehrzahl der Brüche unter einem Winkel von 45 bis 70°. Die Ergebnisse der wenigen Versuche mit Nahtbruchwinkeln $\alpha = 0^\circ$ (Herausreißen aus dem Querblech) und $\alpha = 90^\circ$ (Scherversagen in der Übergangszone) können nur unter Vorbehalt in die Auswertung einbezogen werden. In den Tabellen 9 (Einzelstirnnähte), 10 bis 13 (Doppelstirnnähte) sind neben den Probenabmessungen, den Versuchsergebnissen und der Beurteilung der Bruchflächen auch die rechnerischen Nahtbeanspruchungen bei Erreichen der Höchstlast - bezogen auf Nahtaußenmaß a und Bruchquerschnitt a^* - sowie deren Mittelwert angegeben. Außerdem ist die Differenz $\Delta = a - a^*$ als Maß für fehlende Wurzeldurchschweißung angegeben. Die in den Spalten 16 und 18 der Tabellen 9 bis 13 angegebenen Mittelwerte werden in Abschnitt 4.3 zur Bewertung herangezogen (Tabelle 16), das in Spalte 11 aufgelistete Differenzmaß Δ ist in Tabelle 15 berücksichtigt und bewertet.

3.3.2 Flankenkehlnahtverbindungen

An den entsprechend Bild 4 vorbereiteten Sonderproben wurde die Bruchlast für eine einheitliche Prüflänge von 60 mm ermittelt. Die Ergebnisse der $15 \cdot 4 = 60$ Einzeluntersuchungen sind in Tabelle 14 zusammengestellt. Mit Ausnahme der Probengruppen BB1 und BB3, bei denen besondere Bedingungen vorlagen (vergl. Abschnitt 4.3.2), erfolgte der Bruch einheitlich unter etwa 45° geneigt im Nahtquerschnitt. Da die Außenabmessung a der Nahtdicke nicht mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden konnte, ist neben der auf die Bruchfläche a^* bezogenen rechnerischen Nahtbeanspruchung τ^* ein Vergleichswert τ_m angegeben, der ersatzweise mit dem Wert $a \sim \frac{t}{\sqrt{12}}$ als Nahtdicke ermittelt wurde. Die in den Spalten 12 und 13 der Tabelle 14 angegebenen Mittelwerte sind in die zusammenfassende Bewertung (Tabelle 16) übernommen, die Nahtabmessungen aus Spalte 6/7 gehen in Tabelle 15 ein.

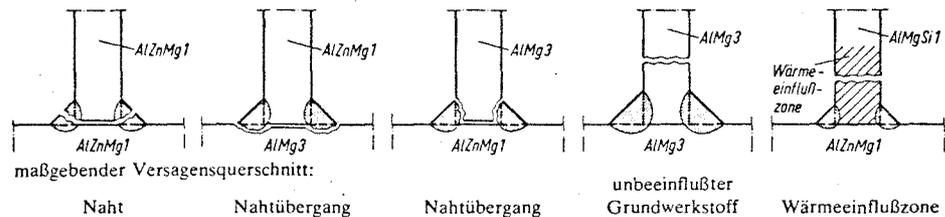
4. Auswertung der Versuchsergebnisse

Die bei der Bewertung der Festigkeit von vorwiegend ruhend beanspruchten Schweißverbindungen und bei der Übertragung von Versuchsergebnissen auf Berechnungsansätze notwendigen Überlegungen sind in ausführlicher Form veröffentlicht /6,8/. Die zulässigen Beanspruchungen für Schweißverbindungen werden im allgemeinen nach Maßgabe der experimentell nachgewiesenen "Festigkeiten" festgelegt. Unter Festigkeit wird die auf einen definierten Querschnitt bezogene Bruchlast verstanden, wobei grob vereinfachende Annahmen getroffen werden müssen. Der tatsächliche örtliche Spannungszustand, der über Nahtlänge und -dicke veränderlich sein kann, sowie Eigenspannungen werden nicht berücksichtigt. Bei Kehlnähten sind überdies zur Kraft- richtung und Lage der Bezugsflächen Vereinbarungen getroffen, die zu den in der Technischen Mechanik üblichen Definitionen scheinbar im Widerspruch stehen. Obwohl DIN 4113 Teil 2 in Tab. 3 (vergl. DIN 1000) eine Vielfalt von Möglichkeiten der Schweißnahtgestaltung anbietet, genügt es, sich zur Beurteilung der Festigkeit auf zwei typische Nahtarten zu beschränken, die Stumpf- und die Kehlnaht. Die für diese Nahtformen möglichen Versagensmechanismen, die den maßgebenden Querschnitt bestimmen, sind /6/ entnommen.



Versagensmechanismen von Stumpfschweißverbindungen.

Bei den für zahlreiche Aluminiumwerkstoffkombinationen geltenden Modellen III und IV für Stumpfnahhtverbindungen sind - im Gegensatz zu dem bei allgemeinen Baustählen üblichen Vorgehen - für den Nahtbereich zulässige Beanspruchungen zu vereinbaren, die deutlich unter den für den ungestörten Grundwerkstoff festgelegten Werten liegen.



Versagensmechanismen von Kehlnahtschweißverbindungen am Beispiel von Aluminiumlegierungen, geschweißt mit Zusatzwerkstoff S-AlMg5.

Bei Kehlnahhtverbindungen sind nur mit Hilfe von vereinfachenden Modellen einigermaßen zutreffende Aussagen über das Tragverhalten und die Tragfähigkeit möglich.

4.1 Beurteilungskriterien

Bei der vergleichenden Gegenüberstellung zur Beurteilung von Stumpf- und Kehlnahtschweißungen müssen folgende Fragen geklärt werden:

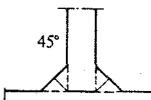
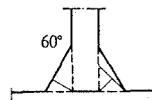
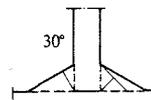
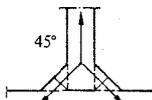
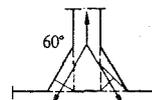
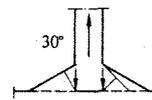
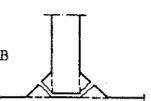
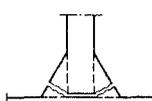
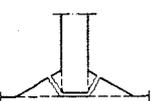
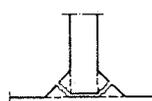
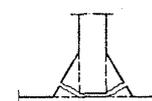
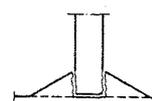
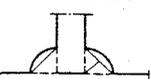
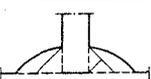
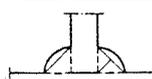
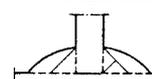
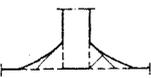
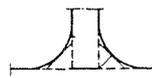
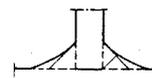
- Eignung der verwendeten Probenform und der Auswertungsmethodik
- Aussagefähigkeit der Versuchsergebnisse
- Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse

Die hier verwendeten Probenformen und die Auswertungsmethodik haben in zahlreichen gezielten Untersuchungen ihre Eignung bewiesen /5,6,7/. Besonders bei Flankenkehlnähten darf eine von der Nahtform unabhängige Grenzbeanspruchung erwartet werden, wenn die erreichte Tragkraft auf den Bruchquerschnitt bezogen wird. Bei Stirnkehlnähten wird dieser Wert je nach Bruchlage in weiterem Rahmen schwanken.

Sofern die Aussagefähigkeit einzelner Versuchsergebnisse fraglich erscheint, sind diese - mit entsprechender Begründung - nicht in die weitere Auswertung einbezogen.

Bei der Entwicklung von Berechnungsvorschlägen ist die Übertragbarkeit von Versuchsergebnissen nur dann gegeben, wenn die jeweils ungünstigste Möglichkeit mit berücksichtigt ist. So war beispielsweise der in /9/ angegebene Weg, von den an Kreuzproben gewonnenen Versuchsergebnissen auf zulässige Schubspannungen zu schließen, sicherlich unrichtig, da die an dieser - nur bedingt geeigneten - Probenform gewonnenen Ergebnisse mindestens 20 % über der rechnerischen Schubfestigkeit liegen und sich bei unkritischer Auswertung weitere Fehlinterpretationen ergeben können, so daß noch erheblich höhere Sicherheitseinbußen möglich sind.

„Kehlnahtfestigkeit“ abhängig von Nahtform und Beanspruchungsrichtung.

Verbindung	Flankenkehlnaht			Stirnkehlnaht		
Naht und Tragmodell	 45° $a^* = a$	 60° $a^* > a$	 30° $a^* > a$	 45°	 60°	 30°
Nahtdicke a	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Minstdicke a^*	1,0	1,22	1,22	1,0	1,22	1,22
Bruchlage a_B						
Bruchzustand						
Traglast F	1,0	1,22	1,22	1,22	1,84	1,41
F/a	1,0	1,22	1,22	1,22	1,84	1,41
F/a_B	1,0	1,0	1,0	1,22	1,50	1,0
andere Formen						
Wölbnah						
Hohlnaht						

4.2 Bewertung der Stumpfschweißungen

Aus den in Tabelle 7 zusammengestellten Ergebnissen geht hervor:

- Die Legierung A (AlZn4,5Mg1) weist im unmittelbaren Nahtbereich gleiche oder höhere Festigkeit als die verwendeten Zusatzwerkstoffe 2 und 3 auf. Der Prozeß des Wiederaushärtens war nach 2 Monaten noch nicht abgeschlossen - nach 2 Jahren erreichten die Festigkeitswerte in der Wärmeeinflußzone nahezu die des ungestörten Grundmaterials. Der maßgebende Querschnitt bei belassener Nahtüberhöhung liegt in etwa 25 mm Abstand von der Naht (vergl. /10/). Modellfall II/III
- Die ausgehärtete Legierung B (AlMgSi1) wird durch den Schweißvorgang so sehr entfestigt, daß sich für alle Zusatzwerkstoffe (1 bis 4) selbst bei abgearbeiteter Nahtüberhöhung der schwächste Querschnitt jeweils in der WEZ befindet. Modellfall IV
- Legierung F (AlMg3) weist in Umgebung der Stumpfnahht etwa gleiche Festigkeit wie die mit dem artgleichen Zusatzwerkstoff S-AlMg3 geschweißte Naht auf. Die mit den Zusatzwerkstoffen 2 und 3 geschweißten Nähte haben dagegen deutlich höhere Festigkeit als der Grundwerkstoff, so daß der Bruch jeweils im Blech erfolgt. Modellfall I/II

In Tabelle 8 sind zum Vergleich die mechanischen Kennwerte von Stumpfnahhtverbindungen (Aus Tab. 7) denen des ungestörten Grundwerkstoffes (aus Tab. 3) gegenübergestellt:

- Bei allen Schweißverbindungen ist die Bruchdehnung A_{50} in dem weniger verformungsfähigen Nahtbereich etwa 20 bis 30 % reduziert.
- Die 0,2-Grenze des 50 mm breiten Meßbereiches, der die Nahtzone erfaßt, beträgt je nach Grundwerkstoff nur noch 44 % (AlMgSi1) bis 65 % (AlMg3) des Ausgangswertes, die in DIN 4113 Blatt 2 (Tab. 1 Sp. 5) angegebenen Richtwerte sind jedoch erfüllt.
- Die Beeinträchtigung der Zugfestigkeit in der WEZ ist erwartungsgemäß nur bei der aushärtbaren Legierung B erheblich (über 30 % Abminderung).

Es bietet sich an, Nachweise für Nahtquerschnitt und WEZ zu führen, wie dies in /1/ vorgesehen ist. Hierbei sollte gegen einen Mindestfestigkeitswert abgesichert werden - z.B. die in DIN 1732 (Teil 2, Tab. 2) angegebenen Werte für Stumpfnähte oder die in früheren Entwürfen zu DIN 4113 enthaltenen Werte für die Wärmeeinflußzone. Das Absichern gegen die 0,2-Grenze der WEZ mit einem Sicherheitskoeffizienten $\hat{v}_H = 1,7$ (bzw. $\hat{v}_{HZ} = 1,5$) erscheint - wegen des relativ schmalen Bereiches mit veränderten mechanischen Eigenschaften - nicht sehr sinnvoll, da sich keine unzumutbaren oder unkontrollierbaren Verschiebungen bei örtlichem Auftreten von bleibenden Veformungsanteilen ergäben. Benachteiligt werden insbesondere die nicht aushärtbaren, aber verfestigten Halbzeuge vom Legierungstyp AlMg_{4,5}Mn (G 31 gegenüber F 27/W 28) und AlMg₂Mn_{0,8} bzw. AlMg₃ (F 24/25, G 24 gegenüber F 18/19, W 18/19). Das Problem ist in Abschnitt 4.4 nochmals aufgegriffen. Sinnvoll wäre jedenfalls, unter Gebrauchslast die 0,2-Grenze der WEZ nicht planmäßig zu überschreiten, was eine Empfehlung von Koeffizienten $\hat{v}_H \geq 1,25$ ($\hat{v}_{HZ} \geq 1,1$) rechtfertigt.

4.3 Bewertung der Kehlnahtschweißungen

Auf die Problematik der Festigkeitsbewertung von Kehlnähten ist in /6/ eingegangen, wobei auf die vorerwähnten Möglichkeiten der Fehlinterpretation bei Stirnkehlnähten hingewiesen ist. Unter besonderer Berücksichtigung der bei Aluminiumlegierungen in wesentlich höherem Maße auftretenden Entfestigungen durch den Schweißvorgang wird im folgenden versucht, aus den Untersuchungen die Grundlage für ein einfaches, auf alle Werkstoffkombinationen und Nahtformen anwendbares Modell und damit ein befriedigendes Berechnungskonzept zu erarbeiten.

4.3.1 Stirnkehlnahtverbindungen

Die in den Tabellen 9 bis 13 aufgeführten Ergebnisse weisen zunächst aus, daß nur bei wenigen Versuchsgruppen (BB4, AB4) eine gute Durchschweißung der Nahtwurzel erreicht werden konnte. Unter Ausnahme dieser mit dem Zusatzwerkstoff 4 (S-AlSi5) ge-

schweißten Proben liegt der Mittelwert des Differenzmaßes $\Delta = a - a^*$ bei 1 mm, bei Gruppe AB sogar bei 1,5 mm. Die in der Nähe eines Nahtbeginns entnommenen Proben (Nr. 1,3,4,8) weisen häufig Bindefehler auf, wobei die mit S-AlSi5 geschweißten Proben ebenfalls nicht betroffen sind. Bemerkenswerte Poreneinschlüsse wurden nur bei den Gruppen FF2, FF3 und BB4 festgestellt.

Die nach Zusatzwerkstoffen geordneten Ergebnisse lassen beim Vergleich der auf die Bruchflächen bezogenen Tragkraft ("Festigkeit") keine signifikante Abhängigkeit vom verwendeten Grundwerkstoff erkennen, so daß die in Teil 2 der DIN 4113 (Tab. 4b) nach diesem Parameter vorgesehene Differenzierung der "zulässigen Spannungen" ohne Berücksichtigung des Zusatzwerkstoffes für die Materialien

$$A : B : F = 2,0 : 1,5 : 1,0 \text{ nicht gerechtfertigt erscheint.}$$
$$(72 : 54 : 36 \text{ N/mm}^2)$$

Die im Versuch erreichten Maximalwerte wiesen z.B. die Werkstoffkombinationen AF3 und AB3 (245 bzw. 229 N/mm²) auf.

Stellt man die für Doppelkehlnahtverbindungen entsprechender Probengruppen ermittelten Werte wie folgt gegenüber, so zeigt sich, daß aus der Tragfähigkeit abzulesen wäre, daß kein signifikanter Einfluß des Grundwerkstoffes auf die Festigkeit der Kehl Nähte vorhanden ist.

Zusatzwerkstoff	Stirrnahtfestigkeit (N/mm ²) nach DIN 4413 maßgebender Werkstoff			Verhältnis der Festigkeiten
	A (AA)	B (BB, AB)	F (FF, AF)	
2 S-AlMg5	213	182-204	204-214	1,10 : 1,0 : 1,08
3 S-AlMg4,5Mn	216	205-229	206-245	1,0 : 1,0 : 1,04

Vergleicht man dagegen beispielsweise

Grundwerkstoff	Stirrnahtfestigkeit (N/mm ²) für Zusatzwerkstoff				Verhältnis der Festigkeiten
	1	2	3	4	
B AlMgSi1	BB 173	BB AB 182-204	BB AB 205-229	BB AB 151-168	1,08:1,21:1,36:1,0

so wird erkennbar, daß eher eine Differenzierung nach dem Zusatzwerkstoff sinnvoll wäre, wogegen die DIN 4113 für alle genannten Gruppen vom Typ BB, AB gleiche zulässige Spannungen vorsieht. Diese Auswertung bestätigt das bereits in Abschnitt 1 für Vorversuche mitgeteilte Ergebnis: die gegenüber der Normangabe (DIN 4113 Teil 2 Tab. 4b) vorhandenen Sicherheitskoeffizienten der Einzelergebnisse schwankten für Stirnkehlnähte im weiten Rahmen zwischen 2,8 und 6,8!

4.3.2 Flankennahtverbindungen

Für schubbeanspruchte Flankenkehlnähte ist nach /6/ im Gegensatz zu Stirnnähten eine von der Nahtgeometrie (Überhöhung, Einbrand, Ungleichschenkligkeit) nahezu unabhängige Grenzbeanspruchung zu erwarten, wenn die Traglast auf den Bruchquerschnitt bezogen wird.

Die in Tabelle 14 zusammengestellten Ergebnisse zeigen, daß nur bei einigen wenigen Gruppen (AB3, AF3) eine unbefriedigende Nahtwurzeldurchschweißung vorlag, wobei in diesen Gruppen auch Bindefehler ("Kaltschweißungen") festgestellt wurden.

Bemerkenswert ist weiterhin, daß an den mit Zusatzwerkstoffen S-AlMg3,5 und S-AlMg4,5Mn geschweißten Proben aus AlMgSi1 (BB1, BB3) offenbar wegen ungünstiger Wahl der Schweißparameter Materialtrennungen im Grundwerkstoff auftraten, die zu einer drastischen Reduzierung der Tragfähigkeit führten, wobei der Bruch im Grundmaterial verlief. Eine planmäßige Untersuchung des Phänomens, das an den gleichen Werkstoffkombinationen auch im Rahmen von Zulassungsuntersuchungen /11/ festgestellt wurde

und in /12/ sinngemäß erwähnt ist, hat die Herstellerfirma inzwischen unternommen. Die Ergebnisse für die Gruppen BB1 und BB3 sind in die weitergehenden Auswertungen nicht übernommen. Die Kombination BB1 ist nach DIN 4113 Teil 2 Tab. 2 allerdings nicht vorgesehen und bedarf eines besonderen Nachweises.

Wie bei den Stirnkehlnähten (Abschnitt 4.3.1), so kann auch bei Flankenkehlnähten aus den Untersuchungsergebnissen nicht geschlossen werden, daß eine signifikante Abhängigkeit der Festigkeit vom Grundwerkstoff besteht. Die nach DIN 4113 Bl. 2 für LF H zulässigen Spannungen verhalten sich für die Materialien A, B, F wie folgt:

$$A : B : F = 65 : 50 : 30 = 2,17 : 1,67 : 1,0$$

(zul τ_{ll} in N/mm²) Verhältniswert

Die Versuche weisen dagegen aus, daß ein Einfluß dieser Größenordnung nicht vorhanden ist:

Zusatzwerkstoff	Flankennahtfestigkeit (N/mm ²) nach DIN 4113 maßgebender Werkstoff			Verhältnis der Festigkeiten
	A (AA)	B (BB, AB)	F (FF, AF)	
2 S-AlMg5	164	142-153	150-164	1,11:1,0:1,06
3 S-AlMg4,5Mn	167	-164	144-155	1,12:1,10:1,0

Ordnet man nach den Zusatzwerkstoffen zusammenfassend für alle Grundmaterialien

Grundwerkstoff	Flankennahtfestigkeit (N/mm ²) für Zusatzwerkstoff				Verhältnis der Festigkeiten
	1	2	3	4	
A AlZn4,5Mg1		164	167		1,10:1,24:1,26;1,0
B AlMgSi1		142-153	164	123-127	
F AlMg3	127-149	150-164	144-155		

so ergibt sich nahezu das gleiche Bild wie für Stirnkehlnähte: Die Verbindungen mit den Zusatzwerkstoffen 2,3 weisen eine deutlich höhere Festigkeit als die mit S-ALSi5 geschweißten Proben auf.

4.3.3 Zusammenfassende Bewertung

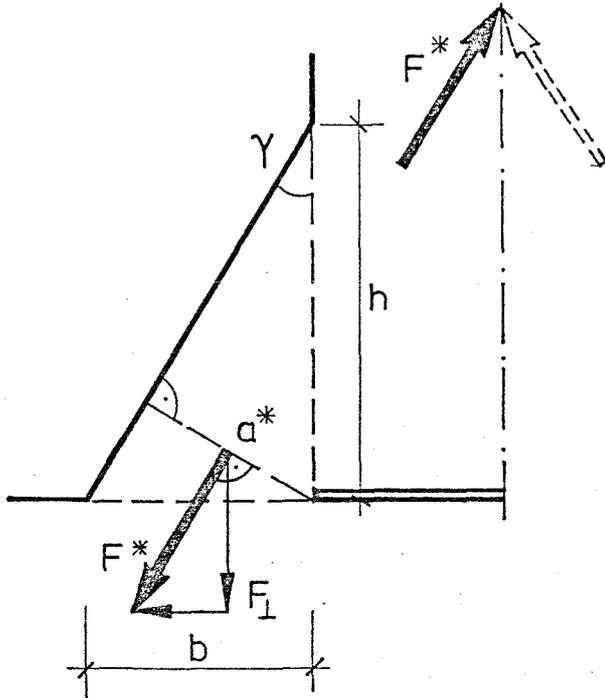
Zur besseren Übersicht sind die wesentlichen Ergebnisse der Kehlnahtuntersuchungen in den Tabellen 15 und 16 zusammengefaßt.

Aus Tabelle 15 wird nochmals deutlich, daß bei Stirnkehlnahtverbindungen eine Durchschweißung der Nahtwurzel in der überwiegenden Zahl der Fälle nicht erreicht wurde, so daß der tatsächliche Nahtquerschnitt von dem nominalen (durch Außenmessung gewonnenen) a-Maß um etwa 1 mm differiert. Ein früheres Untersuchungsprogramm /5/ zeigte - allerdings bei TIG-Schweißungen - ein ähnliches Bild. Weiterhin kann Tabelle 15 entnommen werden, daß nach Maßgabe der verwendeten Elektrodendurchmesser ein entsprechender Unterschied der Nahtdicken feststellbar war

$$\left(\frac{\varnothing 1,6}{\varnothing 1,2} = 1,33 \approx \frac{a_{\text{St}(2,4)}}{a_{\text{Fl}(2,4)}}\right).$$

Vergleicht man die in Tabelle 15 zusammengestellten Versuchsergebnisse für Einzel- und Doppelstirnnähte sowie Flankennähte, so ergibt sich, daß die Einzelstirnnähte im Mittel nur etwa 60 % der Festigkeit von Doppelnähten aufweisen (Spalte 8). Weiterhin geht aus der Auswertung hervor, daß bei Doppelstirnnähten im Mittel eine planmäßig um über 30 % höhere Festigkeit als bei vergleichbaren Flankennähten zu erwarten ist (Spalte 10). In /6,8/ ist an einfachen Modellen gezeigt, daß der Mindestwert bei 22 % liegt und bei ungleichschenkligen Nähten auf über 50 % ansteigen kann. Die Werte der Spalte 10 liegen zwischen 1,23 und 1,58.

Würde man bei senkrecht zu ihrer Richtung beanspruchten Doppelkehlnähten eine Optimierung des Nahtvolumens zur Tragfähigkeit beabsichtigen, so erhält man - bei homogenem Werkstoff - aus den Beziehungen



$$V = \frac{h \cdot b}{2} = \frac{h^2}{2} \operatorname{tg} \gamma$$

$$F^* = a^* \cdot R_m = h \cdot \sin \gamma \cdot R_m$$

$$F_{\perp} = F^* \cdot \cos \gamma = h \cdot \sin \gamma \cos \gamma R_m$$

$$\text{mit } V = \text{const} = 1$$

$$R_m = \text{const} = 1 \quad h = \sqrt{\frac{2}{\operatorname{tg} \gamma}}$$

$$F_{\perp} = \sqrt{\frac{2}{\operatorname{tg} \gamma}} \sin \gamma \cos \gamma$$

einen Maximalwert $F_{\perp} = 0,806$ für $\gamma = 30^\circ$ mit $h = 1,86$,

$a^* = 0,931$ und dem nach den Vorschriften anzusetzenden a-Maß

$\frac{b}{\sqrt{2}} = \frac{h \cdot \operatorname{tg} \gamma}{\sqrt{2}} = 0,76$. Eine gleichschenkelig-rechtwinklige Naht

gleichen Volumens würde dagegen mit $\gamma = 45^\circ$ nur eine Tragfähig-

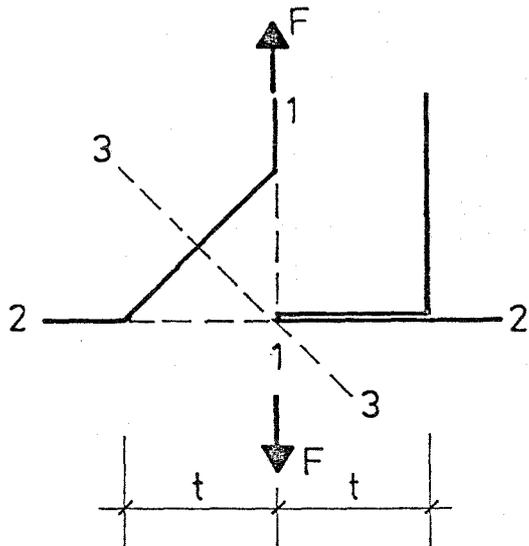
keit $F_{\perp} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$ aufweisen, wobei das rechnerisch anzusetzende

a-Maß 1,0 beträgt.

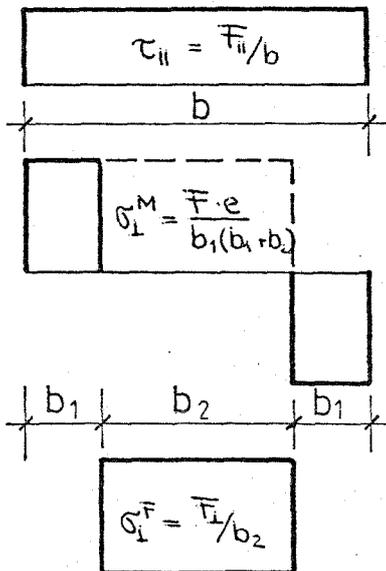
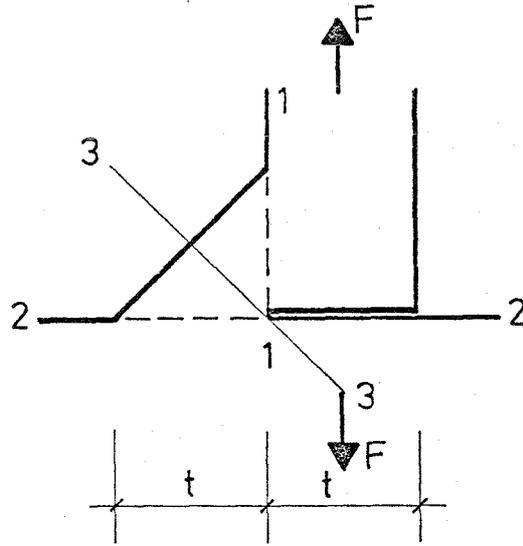
Dies bedeutet, daß trotz "rechnerisch" um 24 % niedrigerem wirksamem Querschnitt bei gleichem Volumen eine um 14 % höhere Tragfähigkeit erwartet werden kann. In der auf Seite 12 wiedergegebenen Tabelle findet sich der entsprechende Bezugswert $\frac{0,806 \cdot 1,0}{0,76 \cdot 0,707} = 1,5 = \frac{1,837}{1,225}$. Die gezielte Nutzung einer den Beanspruchungsverhältnissen angepaßten Nahtgeometrie ist allerdings z.Zt. im konstruktiven Ingenieurbau nicht üblich.

Das Tragverhalten einer Einzelstirnnaht kann mit vereinfachten Modellen nachvollzogen werden. Je nach Verformungsfähigkeit der Probe - die eine Verlagerung der Kraftwirkungslinie in der Verbindung bewirken kann - sind folgende Übertragungsmechanismen denkbar:

Modell 1



Modell 2



Setzt man als Bruchkriterium die Beziehung

$$R_m = \sigma_v = \sqrt{\sigma_I^2 + 3 \tau_{II}^2} \text{ an und be-}$$

rücksichtigt für den maßgebenden Querschnitt (1-1, 2-2, 3-3) jeweils die aus Normalkräften, Querkräften und Biegemomenten resultierenden Spannungskomponenten nach Traglastverstellungen, so erhält man für die Tragfähigkeitsbeziehung

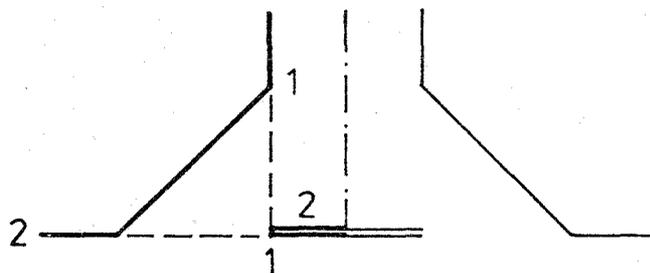
$$\frac{F}{a} = K \cdot R_m \text{ folgende Faktoren K:}$$

$$|\sigma_I^F| = |\sigma_I^M|$$

Modell 1	Modell 2	
0,817	0,535	K (1-1) $b = t = \sqrt{2} a$
0,586	0,334	K (2-2) $b = t$
0,476	0,295	K (3-3) $b = a$
0,67	0,42	$\frac{K_{\min}}{K_{\text{Stirrnaht}}(0,707)}$
0,82	0,51	$\frac{K_{\min}}{K_{\text{Flankennaht}}(0,577)}$

Im Vergleich zu an einfachen Modellen für Doppelstirnnähte (0,707) und Flankenkehlnähte (0,577) gefundenen Werten erhält man für Modell 1 die angegebenen Quotienten 0,67 und 0,82, die recht gut mit den in Tabelle 16 Spalten 8 und 9 angegebenen Werten (Mittel 0,60 bzw. 0,81) korrespondieren. Die Quotienten können allerdings - wie gezeigt - auf die Werte 0,42 bzw. 0,51 absinken, was die Ergebnisse in Tabelle 16 z.B. für Gruppe AB4 bestätigen (0,42 - 0,55).

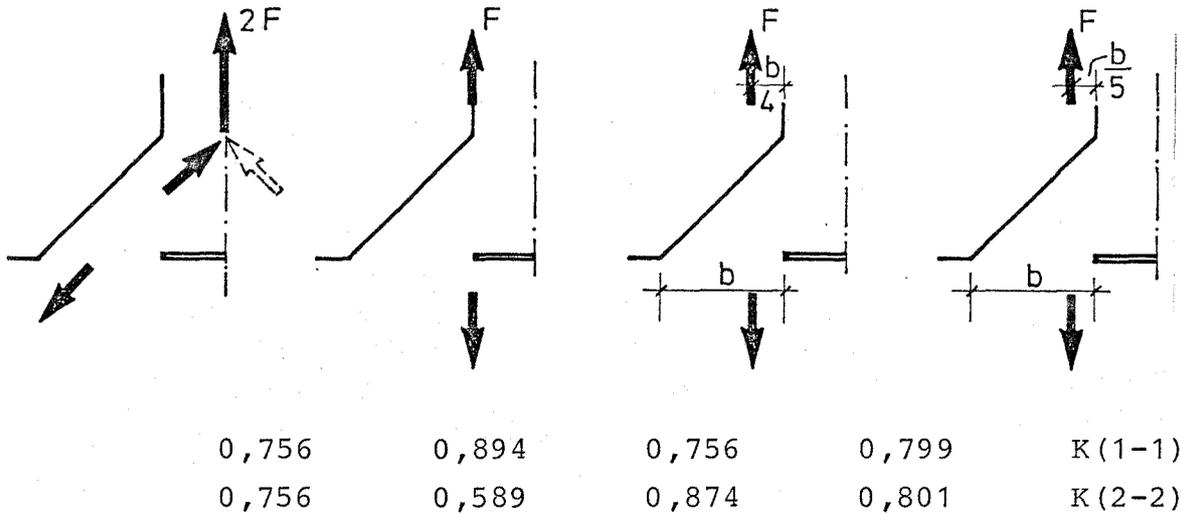
Nach ähnlichen Überlegungen ist bei Aluminiumlegierungen auch eine Betrachtung über die Tragfähigkeit der Anschlußzonen 1-1 und 2-2 durchzuführen, sofern Grundmaterialien mit wesentlich höherfesten Zusatzwerkstoffen verschweißt werden oder in der WEZ erhebliche Festigkeitseinbußen erleiden. Setzt man hier die im Versuchsteil W empirisch gefundene Beziehung $R_m = \sigma_v = \sqrt{\sigma_L^2 + 2,5 \tau_{||}^2}$ als Bruchhypothese für die WEZ ein, so erhält man für die Anschlußquerschnitte 1-1 bzw. 2-2 rechtwinklig gleichschenkliger Flankenkehlnähte einheitlich:



$$\max F_{||} = a \cdot \sqrt{2} \tau_{||m(WEZ)} = \frac{a \sqrt{2}}{\sqrt{2,5}} R_m(WEZ)$$

$$\frac{\max F_{||}}{a} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2,5}} R_m(WEZ) = 0,894 R_m(WEZ)$$

Für Stirnkehlnähte können dagegen - je nach Tragmodell - folgende $K_{(WEZ)}$ -Werte ermittelt werden ($\frac{\max F}{a} = K \cdot R_{m(WEZ)}$):



Faßt man den letzten dieser - für Doppelkehlnähte sämtlich möglichen - Übertragungsmechanismen als eine Optimierung der Randbedingungen auf, so kann ein sowohl für Flanken- wie Stirnkehlnähte geltender Grenzwert für die Absicherung gegen ein Versagen im Übergangsquerschnitt angegeben werden: demnach muß - nach dem zugrunde gelegten Sicherheitskonzept ($v_{Br(H)} = 2,5$) -

$$\frac{zul\tau_{II} \text{ (bzw. } zul\varphi_I \text{)}}{R_{m(WEZ)}} < \frac{K_{(WEZ)}}{2,5} = \frac{0,80}{2,5} = 0,32 \text{ sein,}$$

d.h. daß generell die für Kehlnähte im LF H zugelassenen Beanspruchungen höchstens 32 % der Zugfestigkeit der WEZ betragen dürfen. Auch hier könnte durch entsprechende Veränderung der Nahtgeometrie eine Erhöhung der Tragfähigkeit bei gleichem Nahtvolumen erreicht werden - z.B. ungleichschenklige Nähte oder Hohl­nähte.

Den vorausgegangenen Überlegungen zum Tragverhalten von Kehlnähten liegt die grob vereinfachende Näherung zugrunde, daß trotz Aufmischungen und Gefügeänderungen für einen Bruch im Nahtquerschnitt a^* die Festigkeit des Zusatzwerkstoffes, für einen Bruch in der Übergangszone die Festigkeit des wärmebeeinflussten Grundwerkstoffes als ausschlaggebende Größe angesetzt werden kann. Da die Versuche diese Vereinfachung als zulässig bestätigen, kann im folgenden ein ebenso einfaches wie praktikables Dimensionierungskonzept entwickelt werden.

5. Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse und Berechnungsvorschläge

Aus Gründen der Vereinfachung erscheint es sinnvoll, nach Maßgabe der in DIN 1732 angegebenen Richtwerte und unter Berücksichtigung der Versuchsergebnisse die für Schweißverbindungen von Aluminiumkonstruktionen zum Einsatz kommenden Elektroden in nur zwei Festigkeitsklassen zu gliedern und für diese die zulässigen Beanspruchungen abzuleiten. Nach Tabelle 2 des Teils 2 DIN 1732 bietet sich folgende Einteilung an:

Zusatzwerkstoff	Festigkeitsrichtwerte R_m Stumpfnah (N/mm ²)			Vorschlag zulässiger Spannungen N/mm ² für Schweißnähte (LF H)		
	DIN 1732 Teil 2 Tab.2	Versuche Tab.7	Vorschlag	Stumpfnah σ	Flanken- Kehlnah $\tau_{ }$	doppelte Stirnnah σ_{\perp}
1 S-AlMg3	177	211	180	72	43	52
4 S-AlSi5	186	>210				
2 S-AlMg5	275	290	250	100	60	72
3 S-AlMg4,5Mn	275	304				
S-AlMn	100	-	(100)	(40)	(24)	(29)

Am Beispiel des Elektrodentyps S-AlMn ist gezeigt, wie die Tabelle für weitere Zusatzwerkstoffe beliebig erweitert werden kann nach der Beziehung:

$$\text{zul } \sigma = \frac{R_m}{2,5} \quad \text{zul } \tau_{||} = 0,6 \cdot \text{zul } \sigma \quad \text{zul } \sigma_{\perp} = 1,2 \cdot \text{zul } \tau_{||}$$

Für Bauteile ist eine Berücksichtigung der 0,2-Grenze bei Vereinbarung zulässiger Spannungen für den ungestörten Grundwerkstoff sicher sinnvoll, da hierdurch das unkontrollierte Anwachsen von Verformungen in größeren Bereichen verhindert wird. Es erscheint jedoch äußerst fragwürdig, in der eng begrenzten Wärmeeinflußzone eine entsprechende Berechnung nach elastizitätstheoretischen Gesichtspunkten durchzuführen und gegen die 0,2-Grenze mit einem "Sicherheitskoeffizienten" ($\psi = 1,7$ LF H) "abzusichern", da örtliches Überschreiten des elastischen Bereiches infolge Zwängungsspannungen usw. ohnehin nicht vermieden werden kann noch muß. Sinnvoller ist der Weg, eine ausreichend hohe Sicherheit gegen das Versagen infolge eines Bruches in der WEZ zu gewährleisten. Die in Abschnitt 4.2 erwähnte Empfehlung, die Lastspannungen nur etwa 80 bzw. 90 % (LF H bzw. HZ) des für die WEZ zu garantierenden Mindestwertes $R_{p0,2}(50 \text{ mm})$ erreichen zu lassen, ist in nachfolgende Übersicht aufgenommen. Bei den weichen oder warmgewalzten Halbzeugen der nichtaushärtbaren Legierungen vom Typ AlMg4,5Mn W28/F27 und AlMg3 F18/19, W18/19 mit niedriger 0,2-Grenze des ungestörten Grundwerkstoffes stellt der Nachweis des Bauteiles ohnehin sicher, daß eine entsprechende Dimensionierung erfolgt (DIN 4113, Blatt 1, Tabelle 4). Aus diesem Grund kann für die WEZ vereinfachend vereinbart werden:

Legierungstyp Grundwerkstoff	Mindestwerte für die WEZ in N/mm ²		Zulässige Beanspruchung (LFH) in N/mm ²			Bemerkungen
	$\beta_{0,2}$ (WEZ)	β_z (WEZ)	Zug, Druck	Schub	Grenzwert (Kehlnaht)	
A AlZn4,5Mg1	(180)	270	108	65	86	Zusatzwerkstoff?
B AlMgSi1	(125)	180	64	39	58	
C AlMgSi0,5	(80)	110	44	26	35	
D AlMg4,5Mn	(125)	270	108 (100)	65 (60)	86	Berücksichtigung: [$\beta_{0,2}$ Grundwerkst. ($\psi = 1,7$)] $\beta_{0,2}$ WEZ ($\psi = 1,25$)
E AlMg2Mn0,8 F AlMg3	(80)	180	72 (64)	43 (38)	58	

Vorschlag zur Festlegung zulässiger Beanspruchungen für die Wärmeeinflußzone (WEZ)

In der Tabelle sind nur die in DIN 4113 aufgeführten Legierungen enthalten, sie kann aber beliebig erweitert werden. Die zulässigen Beanspruchungen sind wie vorher ermittelt ($\sqrt{v_{Br}} = 2,5$), der Grenzwert für Kehlnähte ist entsprechend Abschnitt 4.3.3 zu $0,32 R_{m(WEZ)}$ festgelegt.

Der Vergleich der beiden Tabellen macht deutlich, daß bei stumpfgeschweißten Verbindungen der in DIN 4113 angegebenen Legierungen in den zulässigen Kombinationen der kritische Querschnitt, für den die Dimensionierung erfolgen muß, wie folgt erwartet werden kann (Nahtüberhöhung abgearbeitet):

Werkstoff	Zusatz	Dimensionierungsquerschnitt
A,D	alle	Naht
E,F	2,3	WEZ
	1,4	WEZ (Naht)
B,C	alle	WEZ

Bei rechtwinklig gleichschenkligen Kehlnähten liegt der "kritische Querschnitt" fast immer in der Naht - nur bei den folgenden Kombinationen muß die Möglichkeit eines Versagens in der Übergangszone berücksichtigt werden:

Gruppe	Grundwerkstoff	Zusatzwerkstoff	Vergleich der Richtwerte
E2 E3	AlMg2Mn0,8	S-AlMg5	58 < 60 (bzw. 72)
F2 F3	AlMg3	S-AlMg4,5Mn	
B2 B3	AlMgSi1		
C1 C2 C3 C4	AlMgSi0,5	alle	35 < 43 (bzw. 52)

In den Bildern 5 bis 8 sind die Versuchsergebnisse für Kehlnahtverbindungen nach den vorher vorgeschlagenen Festigkeitsklassen zusammengestellt und die Häufigkeitsverteilung aufgetragen. Die bei den Untersuchungen verwendeten Materialien AlMg3 und AlMgSi1 waren in der WEZ nicht so stark entfestigt, daß entsprechend den genannten Voraussetzungen ein Bruch in der Übergangszone erfolgte ($R_{m(WEZ)} = 225 > 180 \text{ N/mm}^2$!). Dies ist bei der nachfolgenden Gegenüberstellung entsprechend zu berücksichtigen.

Legierungstyp Zusatzwerkstoff	Stumpfnah Richtwert R _m DIN 1732 Vor- Bl. 2 schlag Tab.2		Mittelwert und kleinster Einzel- wert der Versuchs- ergebnisse Flanken- Stirn- Kehlnah Festigk.max F/a*. 1		Vorgeschlagener (LFH) zulässiger Wert (gerundet)		Rechnerischer Sicherheits- beiwert (LFH)	
	N/mm ²				τ_{II} N/mm ²	σ_{LD} N/mm ²	γ_{II}	γ_{LD}
1 S-AlMg3	177	180	131	179	45	55	2,91	3,25
4 S-AlSi5	186		(116)	(140)			(2,58)	(2,55)
2 S-AlMg5	275	250	155	210	60	75	2,58	2,80
3 S-AlMg4,5Mn	275		(137)	(175)			(2,28)	(2,33)

In allen Fällen ist ein ausreichender Sicherheitskoeffizient (Versuchsmittelwert: zulässiger Wert H) > 2,5 vorhanden. Der bei Berücksichtigung des niedrigsten Einzelergebnisses errechnete Quotient beträgt $\gamma_{\min} = 2,28$. Dies muß als befriedigende Absicherung des vorgeschlagenen Konzeptes - das sinngemäß bereits 1975 in den Arbeitsausschuß der DIN 4113 Teil 2 eingebracht wurde /13/ - angesehen werden. Abschließend sei darauf hingewiesen, daß der in der Ausarbeitung der ECCS-Arbeitsgruppe T 2 "Aluminium Alloy Structures" enthaltene Vorschlag /14/ ebenfalls eine sinngemäß ähnliche Differenzierung der zulässigen Beanspruchungen nach der Festigkeitsklasse der Zusatzwerkstoffe vorsieht (/14/, Tab. 6.2).

6. Zusammenfassung Teil GZ

Programm GZ - Grundwerkstoff-Zusatzwerkstoff-Kombinationen

Auch die neueste Fassung des Entwurfs der - für geschweißte Aluminiumkonstruktionen geltenden - Norm DIN 4113 - Teil 2 (Mai 1980) berücksichtigt planmäßig nur einen Teil der verfügbaren, schweißgeeigneten Werkstoffe und der möglichen Werkstoffkombinationen. Die als Berechnungsgrundlage angegebenen zulässigen Beanspruchungen stehen in keiner einleuchtenden Beziehung zur tatsächlich vorhandenen Tragfähigkeit, da die je nach Zusatzwerkstoff unterschiedlichen Festigkeitswerte keine Berücksichtigung finden, sondern eine Differenzierung nach Maßgabe der verwendeten Grundwerkstoffe vorgenommen wird. Das Einbeziehen weiterer Grund- und Zusatzwerkstoffe ist durch das zugrunde gelegte unübersichtliche Konzept erschwert.

Die Auswertung früherer Untersuchungen zeigte bereits, daß andere Berechnungsmodelle befriedigendere Ergebnisse liefern würden. Zahlreiche Vorversuche an mit gleichem Zusatzwerkstoff (S-ALMg5) verschweißten Kehlnahtproben aus unterschiedlichen Grundmaterialien (ALMg3-ALMg5-ALZn4,5Mg1) bewiesen beispielhaft, daß die in DIN 4113 vorgenommene Staffelung der für die genannten Verbindungen zulässigen Beanspruchungen (Verhältnis 1:1,5:2,0) aus den erreichten Tragfähigkeiten nicht gerechtfertigt werden kann, da die im Versuch ermittelten Grenzbeanspruchungen für die drei Probengruppen nahezu gleich hoch waren (1,0:1,10:1,04).

Experimentelle Untersuchungen

Zur Entwicklung und Absicherung eines allgemeiner gültigen, übersichtlicheren - leicht erweiterbaren - Dimensionierungskonzeptes für geschweißte Aluminiumkonstruktionen unter vorwiegend ruhender Belastung wurde zunächst ein Versuchsprogramm entworfen, durchgeführt und ausgewertet, das insgesamt nahezu 300 Einzelzugversuche umfaßte. Als Grundwerkstoffe kamen 8 mm dicke Bleche der folgenden Legierungen zum Einsatz:

Kurz - Bezeichnung	Typ
A AlZn4,5Mg1	selbstwiederaushärtender Werkstoff
B ALMgSil	aushärtbarer Werkstoff
F ALMg3	nicht aushärtbarer Werkstoff

Die Schweißverbindungen (Stumpfnahht, Stirnkehlnahht, Flankenkehlnahht) wurden unter Verwendung der Zusatzwerkstoffe

Kurz - Bezeichnung

- | | |
|---|-------------|
| 1 | S-AlMg3 |
| 2 | S-AlMg5 |
| 3 | S-AlMg4,5Mn |
| 4 | S-AlSi5 |

gefügt, und zwar

Stumpfnahhtverbindungen A2, A3, B1, B2, B3, B4, F1, F2, F3

der 9 Kombinationen

Kehlnahhtverbindungen BB1, FF1, AF1 - AA2, BB2, FF2, AB2, AF2 -

der 15 Kombinationen AA3, BB3, FF3, AB3, AF3 - BB4, AB4

Die Proben wurden bei den Versuchen einer zügigen Beanspruchung bis zum Erreichen der Traglast unterworfen. Die Untersuchungsergebnisse zeigen überzeugend, daß das nachfolgende Dimensionierungskonzept eine zuverlässige Absicherung gegen das Versagen geschweißter Konstruktionen gewährleistet, wobei eine einheitliche Beziehung zur tatsächlich vorhandenen Tragfähigkeit hergestellt ist.

Stumpfnahhtverbindungen - Ergebnis und Bewertung

Nur bei Proben mit abgearbeitetem Nahtwulst der Gruppen A2, A3 und F1 erfolgte der Bruch im Nahtquerschnitt der Stumpfverbindung, in allen anderen Fällen versagten die Proben in der Wärmeeinflußzone, meist in 15-30 mm Abstand von der Stumpfnahht. Der Nachweis einer Stumpfverbindung muß die Tragfähigkeit des Nahtquerschnittes und der Nahtumgebung (WEZ) berücksichtigen. Da Stumpfschweißungen mit gegenüber dem wärmebeeinflußten Grundwerkstoff erheblich niedrigerfesten Zusatzwerkstoffen ohnehin unüblich und unzweckmäßig sind, genügt in der Mehrzahl der Fälle ein Nachweis für die WEZ der verbundenen Teile. Lediglich für das Grundmaterial AlZn4,5Mg1 würde die Entwicklung noch höherfester Zusatzwerkstoffe einen gewissen Gewinn bedeuten können, sofern die Wiederaushärtung aller Bereiche zuverlässig gewährleistet werden könnte. Als Sicherheitskoeffizient für den Lastfall H ist $\nu = 2,5$ gewählt, der für Kehlnahhtverbindungen angegebene Grenzwert dient zur Absicherung gegen ein Versagen in der wärmebeeinflußten Nahtanschlußzone.

Kehlnahtverbindungen - Ergebnis und Bewertung

Da die Tragfähigkeiten quer- oder längsbeanspruchter Kehlnahtverbindungen (Stirn- und Flankenkehlnähte) - wie die Versuche zwingend bewiesen haben - in erster Linie von der Festigkeit der verwendeten Zusatzwerkstoffe abhängen, ist es gerechtfertigt, die für Kehlnähte zulässigen Spannungen ohne Rücksicht auf den Grundwerkstoff festzulegen. Für ausschließlich senkrecht zur Nahtichtung beanspruchte Doppel-Kehlnähte sind 20 % höhere Werte als für Flankenkehlnähte zulässig, was durch die Versuchsergebnisse und Modellvorstellungen begründet werden kann. Um aber zusätzlich gegen einen Bruch in der Nahtanschlußzone (WEZ Grundwerkstoff) abzusichern, darf die zulässige Beanspruchung den Wert $0,32 \beta_z$ (WEZ) als Grenzwert nicht überschreiten

Die gezielte Verwendung ungleichschenkliger Kehlnähte zur konstruktiven Optimierung des Quotienten Tragfähigkeit:Nahtvolumen ist angeregt.

Das vorgeschlagene Konzept bietet die Möglichkeit, für sämtliche Grundwerkstoff-Zusatzwerkstoff-Kombinationen ein befriedigendes Absichern geschweißter Verbindungen gegen Versagen zu gewährleisten, sofern Schweißbarkeit, Eignung und Verträglichkeit der verwendeten Materialien nachgewiesen sind.

II. Teil W (Wärmeeinflußzone) - Tragfähigkeitserhöhung von Aluminium-Schweißverbindungen

Da die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen und theoretischen Überlegungen zu diesem Programmteil bereits in ausführlicher Form /15/ veröffentlicht sind, kann der in der Zeitschrift ALUMINIUM erschienene Artikel als Teil des Schlußberichtes übernommen werden.

In der Einleitung ist die Problemstellung und Zielsetzung erläutert. Ergänzend sei angefügt, daß in Vorversuchen an einer Reihe von Schweißverbindungen "Kennwertprofile" für unterschiedliche Werkstoffkombinationen entsprechend einem früheren Vorschlag /5/ erstellt wurden, um die Beeinträchtigung der Festigkeitseigenschaften in der Umgebung von Schweißnähten sichtbar zu machen. Die Bilder 9 und 10 zeigen beispielhaft

- die Auswirkung bei Reinaluminium (Profil 1)
- die Auswirkung bei verfestigter, aber nicht aushärtbarer Legierung (2)
- die geringe Auswirkung bei nicht aushärtbaren Legierungen (3 bis 6)
- den starken Einfluß bei aushärtbaren Legierungen (7,8)
- die besondere Auswirkung bei selbstaushärtender Legierung (9)

Das Kennwertprofil 8 wurde übrigens an einer für das Teilprogramm W vorgesehenen Probe ermittelt.

Die in /15/ beschriebene Probenfertigung ist auf den Bildern 11 bis 13 noch deutlicher dargestellt, die Ergebnisse der Einzeluntersuchungen sind ausführlich in den Tabellen 17 bis 19 mitgeteilt. Tabelle 20 enthält Ergebnisse von weiteren - an vorgedehnten Proben durchgeführten - Versuchen, die ebenfalls in die Auswertung einbezogen werden konnten:

Der Vergleich der für die 114 Einzelproben rechnerisch ermittelten Tragfähigkeit mit dem Versuchsergebnis ist den Spalten 5, 7 und 8 der Tabellen 17 bis 20 zu entnehmen, auf die ausgezeichnete Übereinstimmung ist in /15/ hingewiesen.

Alle weiteren Erläuterungen zu Konzept, Durchführung und Auswertung der experimentellen Untersuchungen sowie zu den Modellvorstellungen und Berechnungsansätzen, die den theoretischen Überlegungen zugrunde lagen, und schließlich der Hinweis auf eine Pilotstudie für weitergehende Untersuchungen sind dem folgenden Abdruck "Verbesserung der Tragfähigkeit von Aluminium-Schweißverbindungen" zu entnehmen. Die Zusammenfassung sei hier der Übersichtlichkeit halber nochmals wiedergegeben:

Zur experimentellen Ermittlung des Einflusses der Nahtlage auf die Tragfähigkeit von Stumpfschweißungen wurden Versuche mit geschweißten Blechen aus AlMgSi1 (Zusatzwerkstoff: S-AlSi5) durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, daß die an geschweißten Vollstößen ermittelte Tragfähigkeitseinbuße von 28 % gegenüber dem ungestörten Grundmaterial sich durch entsprechende Nahtanordnung teilweise kompensieren läßt; bei 30° Nahtneigung z.B. konnte für breitere Proben die Traglast um 25 % gesteigert werden. Um diese Ergebnisse einer Rechnung zugänglich zu machen, wurde ein empirisches Verfahren für jede der drei im Versuch beobachteten typischen Bruchformen entwickelt. Der Vergleich zwischen Rechnung und Versuch weist eine gute Übereinstimmung auf. Erste Vorversuche lassen den Schluß zu, daß diese für ruhende Belastung gefundenen Ergebnisse für wechselnde Belastung zumindest qualitativ gültig sind.

G. Werner, Stuttgart

Verbesserung der Tragfähigkeit von Aluminium-Schweißverbindungen

(Mitteilung aus der Amtlichen Forschungs- und Materialprüfungsanstalt für das Bauwesen der Universität Stuttgart)

Bei der Berechnung von vorwiegend ruhend beanspruchten Aluminiumkonstruktionen des Ingenieurbaus gemäß DIN 4113 können Schweißverbindungen die Dimensionierung der Bauteile wegen der in den Wärmeeinflußzonen auftretenden Entfestigungen erheblich beeinflussen. Während bei den nichtaushärtbaren Legierungen des Typs AlMgMn, AlMg durch den Schweißvorgang der oft ungewollte, mit einer Beeinträchtigung der Verformungsfähigkeit verbundene Verfestigungseffekt aus dem Fertigungsprozeß rückgängig gemacht wird, gehen bei den aushärtbaren Legierungen (Typ AlMgSi, AlZnMg) die durch planmäßig vorgenommene Behandlung erreichten Verbesserungen der Materialeigenschaften verloren. Die zu berücksichtigenden Festigkeitseinbußen liegen für nichtaushärtbare Werkstoffe in der Größenordnung von 10 bis 25%, für aushärtbare Legierungen jedoch bei bis zu 45%¹⁾. Bei einigen Anwendungsbereichen für geschweißte Konstruktionen werden deshalb von vornherein die Kennwerte des Materialzustandes weich als für die Bemessung der Gesamtkonstruktion maßgebend angesehen. Zwar kann bei den aushärtbaren Legierungen eine Festigkeitssteigerung durch entsprechende aufwendige Wärmenachbehandlung erzielt werden und einige Werkstoffe (Typ AlZnMg) verfügen über die Fähigkeit, bei Raumtemperatur wieder selbst auszuhärten, in der Regel wird man jedoch nach konstruktiven Möglichkeiten zur Lösung des Problems suchen müssen. Bei Bauteilen mit über Länge oder Querschnitt veränderlicher Beanspruchung (z. B. Biegeträger) wird man geschweißte Anschlüsse, Verbindungen und Stöße zweckmäßig in niedrigbeanspruchte Bereiche verlegen – jedoch entfällt diese Möglichkeit bei zug- bzw. druckbeanspruchten Stäben (z. B. Fachwerke).

Unter Verwertung eigener Anregungen zur Neufassung von DIN 4113 E, Blatt 2, wie die Entfestigung von Teilbereichen (z. B. verursacht durch längslaufende Schweißnähte) in vereinfachenden Rechengängen zu berücksichtigen sei, und eines Hinweises auf die erhöhte Tragfähigkeit bei besonderen Nahtanordnungen²⁾ entstand das Versuchsprogramm zur experimentellen und theoretischen Ermittlung des Einflusses der Nahtlage auf die Tragfähigkeit von Stumpfschweißungen. Damit soll der Nachweis erbracht werden, daß diesem ungünstigen Effekt durch eine einfache konstruktive Maßnahme – das Anordnen schräg zur Kraft-

richtung verlaufender Nähte – erfolgreich begegnet werden kann. Ähnliche frühere Untersuchungen an geschweißten Verbindungen von allgemeinen Baustählen unter ruhender und dynamischer^{3) bis 5)} Beanspruchung waren zu einem Zeitpunkt aktuell, als auch bei diesen Werkstoffen das Schweißen als Fügetechnik wegen der geringen, damals im Nahtbereich erzielbaren Festigkeitswerte noch eine Schwächung der Konstruktion bedeutete.

Experimentelle Ermittlung der Tragfähigkeit

Versuche

Als Ausgangsmaterial für die Untersuchungen wurden 4 mm dicke Bleche einer warmausgehärteten Aluminiumlegierung vom Typ AlMgSi1 verwendet, als Zusatzwerkstoff kam S-AlSi5 zum Einsatz. Die Zusammensetzung der Materialien ist in Tafel 1 aufgeführt. Die mechanischen Kennwerte des ungestörten Grundmaterials längs und quer zur Fertigungsrichtung sind in Tafel 2 enthalten. Die Werte beweisen, daß die Bleche als isotrop angesehen werden können, was eine Voraussetzung für die vereinfachte Herstellung der Proben des Hauptversuchsprogrammes war: jeweils zwei Blechstreifen der Abmessungen 120 mm x 1000 mm x 4 mm wurden maschinell ohne Vorwärmung in Längsrichtung zu den auf Bild 1 dargestellten Prüfstücken verschweißt (MIG, pulsed arc.).

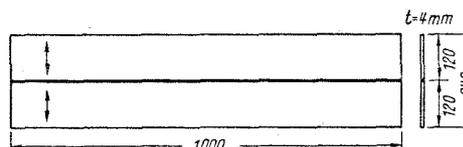


Bild 1: Form und Abmessungen des geschweißten Prüfstückes

Die Ergebnisse von quer zur Nahtichtung beanspruchten Stumpfnahthproben in Tafel 2 verdeutlichen den Festigkeitsabfall in der Wärmeeinflußzone; die angegebenen Bruchdehnungen $A_{1(50\text{ mm})}$ sind entsprechend den geltenden Empfehlungen ermittelt. Um einen Überblick über die Veränderung der mechanischen Eigenschaften im Nahtbereich zu erhalten, wurden weiterhin 9 Proben (Abmessungen 4 mm x 12 mm) entsprechend Bild 2 in Nahtichtung entnommen und geprüft. Die in Tafel 2 aufgenommenen Werte sind als „Kennwertprofil“ des Schweißnahtbereiches dargestellt und zeigen, daß die Gesamtbreite der WEZ etwa 30 mm betragen dürfte.

Zur empirischen Ermittlung einer formelmäßigen Beziehung als „Bruchhypothese“ der Wärmeeinflußzone für den ebenen Spannungszustand war neben der Zugfestigkeit $R_m(\text{HAZ})$ die Bestimmung der Schubfestigkeit $S_m(\text{HAZ})$ an einer eigens hierfür entworfenen Probe erforderlich (Bild 3).

Tafel 1: Zusammensetzung der verwendeten Materialien (Angaben in % der Masse)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr
Grundmaterial t = 4 mm AlMgSi1 wa (Analyse)	1,10	0,31	0,03	0,35	0,79	0,02	0,01	<0,01
Zusatzwerkstoff 1,6 mm Dmmr. S-AlSi5 (AA 4043) (Herstellerrichtwerte)	4,5 bis 6,0	0,8	0,3	0,05	0,05	0,1	0,2	-

Tafel 2: Mechanische Werkstoffkennwerte

Materialzustand	Prüfbedingungen	Mechanische Werkstoffkennwerte				
AlMgSi1 F32 wa t = 4 mm	Probenform und Prüfrichtung	Anzahl der Versuche	Dehngrenze $R_{p0,2}$ in N/mm ²	Zug-(Schub-)festigkeit $R_m(S_m)$ in N/mm ²	Bruchdehnung A_{10} in %	
						UM
Ungestörtes Grundmaterial wa		3	322	344	13,5	
		3	312	344	13,5	
„Schweißverbindung“ (MIG p.a. S-AISI5)	Querstumpfnah	4	193	248 (HAZ)	6,3	
		20		250 (HAZ)	$A_{10(50\text{ mm})}$	
in der Wärmeeinflußzone entfestigt durch Schweißvorgang	Längsproben nach Bild 2	W	1	151	260	18,1
		HAZ	2	246	279	7,0
		UM	6	306	341	13,2
	Schubproben nach Bild 3	8		(158)		

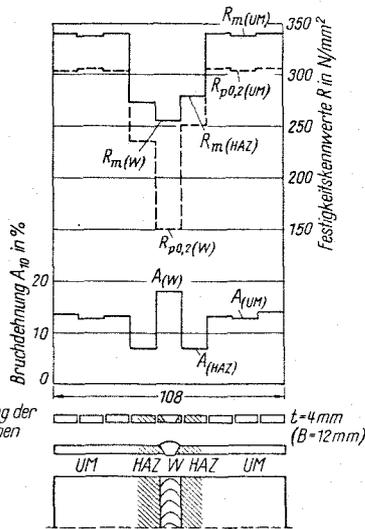


Bild 2: Kennwertprofil des Schweißnahtbereiches (Längsproben B = 12 mm); AlMgSi1 F32 (wa), maschinell geschweißt MIG p.a., S-AISI5 Ø 1,6 mm; W Naht, HAZ Wärmeeinflußzone, UM Ungestörtes Grundmaterial

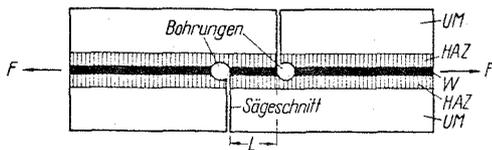


Bild 3: Probe zur Ermittlung der Schubfestigkeit $S_m(HAZ)$; L Prüflänge, W Naht, HAZ Wärmeeinflußzone, UM Ungestörtes Grundmaterial, F Zugkraft

Für die experimentellen Untersuchungen an Modellverbindungen wurden in der auf den Bildern 4 und 5 dargestellten Weise die geschweißten Prüfstücke durch Sägeschnitte in nahezu 120 Einzelproben mit unterschiedlicher Nahtneigung α (0 bis 90°) und Breite B (20 bis 220 mm) zerlegt. Tafel 3 bietet eine Übersicht über die Gesamtheit der prismati-

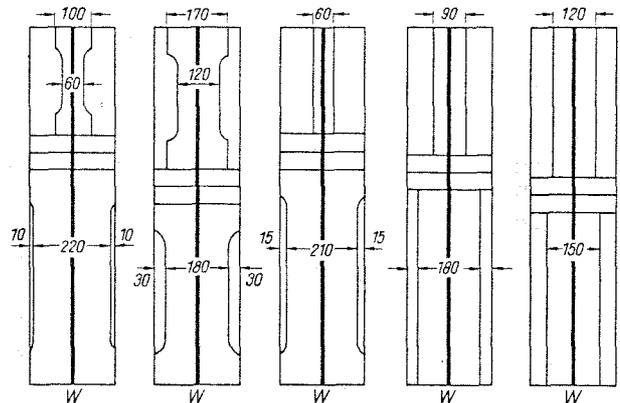


Bild 4: Herstellung der Einzelproben mit Längsnaht ($\alpha = 0^\circ$, B = 60 bis 220 mm) und der Vergleichsproben ($\alpha = 90^\circ$, B = 50 mm) aus den Probeblechen 240 mm \times 1000 mm \times 4 mm; stumpfgeschweißt W-W

schen Flachproben, die bei den Versuchen einer zügigen Beanspruchung ohne weitergehende Messungen bis zum Erreichen der Traglast F_m unterworfen wurden.

Ergebnisse

Bei den Versuchen traten folgende reinen Bruchformen und Mischformen auf (vgl. auch Bild 6):

Bruchform 1: der senkrecht zur Krafrichtung erfolgende Bruch durchkreuzt Naht, Wärmeeinflußzone und ungestörte Bereiche

Bruchform 2: der senkrecht zur Krafrichtung erfolgende Bruch durchkreuzt einseitig die Wärmeeinflußzone und ungestörte Bereiche

Bruchform 3: der Bruch verläuft parallel zur Nahtichtung in der Wärmeeinflußzone.

Aus den im Zugversuch erreichten Traglasten F_m wurden die auf die Probenabmessungen $A = t \cdot B$ bezogenen Bruch-

Tafel 3: Zusammenstellung der Versuchsergebnisse
(47 Gruppen, 114 Einzelversuche)

Nahtwinkel α in °	Probenbreite B in mm	Probenanzahl	Bruchspannung $R_m^* = \frac{F_m}{B \cdot t}$ in N/mm ²	Bruchart (nach Bild 6)
0	60	4	308	1
	90	2	309	1
	120	4	318	1
	150	2	317	1
	180	4	318	1
	210	1	312	1
	220	1	323	1
30	20	2	280	2
	40	5	296	1-2
	60	2	301	1-2
	80	2	310	1-2
	100	2	313	1-2
35	20	1	281	2
	30	3	288	1-2
	40	1	296	1-2
	50	2	295	1
	70	4	301	1-2-3
	80	1	306	1-2-3
40	100	1	(301)	1-2-3
	20	1	267	2
	30	3	274	3
	40	1	278	3
	50	2	287	3
	70	3	283	3
	80	1	289	3
45	100	1	290	3
	20	2	256	2-3
	40	5	262	3
	60	2	269	3
	80	2	264	3
60	100	2	270	3
	20	2	249	2-3
	40	5	251	3
	60	2	256	3
	80	2	254	3
75	100	2	255	3
	20	2	246	2-3
	40	2	250	2-3
	60	2	259	3
	80	2	250	3
90	100	2	254	3
	20	2	236	3
	40	4	247	3
	50	10	250	3
	60	2	256	3
	80	2	247	3
	100	2	253	3

spannungen R_m^* errechnet, deren Mittelwert für die einzelnen Versuchsgruppen neben der jeweils aufgetretenen Bruchart in Tafel 3 aufgeführt ist. Die Untersuchungen zeigen, daß die an geschweißten Vollstößen ($\alpha = 90^\circ$) des vorliegenden Materials ermittelte Tragfähigkeitseinbuße von 28% (344 gegenüber 250 N/mm²) gegenüber dem ungestörten Grundmaterial sich durch entsprechende Nahtanordnung zumindest teilweise kompensieren läßt. Bei einer Nahtneigung von $\alpha = 30^\circ$ konnte für breitere Proben die Traglast um 25% gesteigert werden, und selbst bei einer Neigung von 40° ergab sich noch ein Zugewinn von 15%. Aus den Ergebnissen wird erkennbar, daß sich für Nahtneigungen $\alpha < 45^\circ$ bei breiteren Proben eine deutliche Erhöhung der bezogenen Tragfähigkeit R_m^* ergibt, ohne daß der Bruchmechanismus (Bruchart 3) sich verändert, während bei schmalen Proben bei Nahtneigungen $\alpha = 45^\circ$ auch ein Versagen nach Bruchart 2 festgestellt werden kann. Beobachtungen während der Zugversuche an Proben der Versuchsgruppe $\alpha = 0^\circ$ (in Kraftrichtung verlaufende Längsnaht) zeigten deutlich, daß bei Bruchart 1 der Bruch – wie zu erwarten – in der weniger verformungsfähigen Wärmeeinflußzone eingeleitet wird.

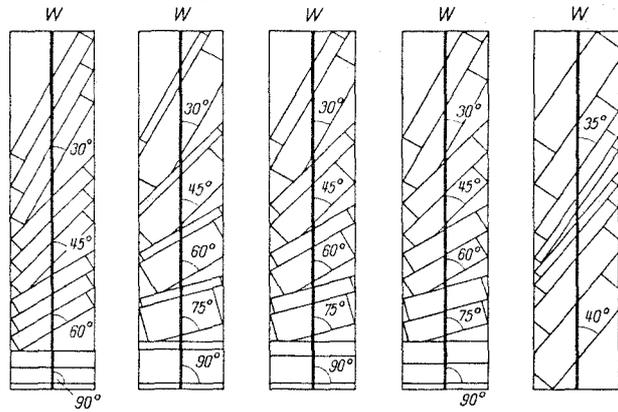


Bild 5: Herstellung der Einzelproben mit unterschiedlicher Nahtneigung ($\alpha = 30$ bis 90°) und Breite ($B = 20$ bis 100 mm) aus den Probeblechen 240 mm \times 1000 mm \times 4 mm; stumpfgeschweißt W-W

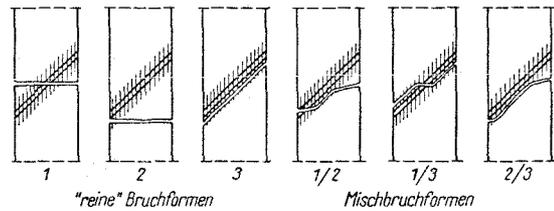


Bild 6: Zusammenstellung der bei den Versuchen beobachteten Bruchformen

Rechnerische Ermittlung der Tragfähigkeit

Um die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen für Bruchart 1 und 2 rechnerisch nachvollziehen zu können, muß zunächst ein geeignetes Modell der möglichen Spannungsverteilung in den Probenquerschnitten aus entsprechenden Verträglichkeitsbedingungen ermittelt werden. Bei Berücksichtigung des unterschiedlichen Spannungs-Dehnungs-Verhaltens (Bild 7) ergibt sich, daß in den ungestörten Bereichen außerhalb der WEZ bei gleicher Dehnung

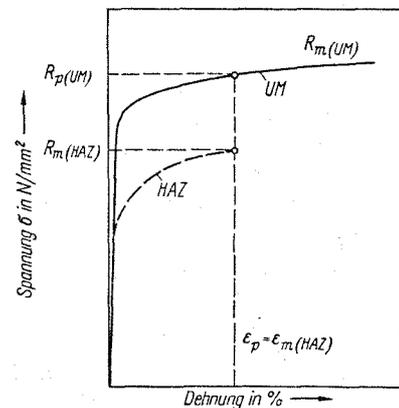


Bild 7: Spannungs-Dehnungs-Beziehung für ungestörtes Material (UM) und Wärmeeinflußzone (HAZ), schematisch

eine Grenzbeanspruchung $R_{p(UM)}$ von etwa 320 N/mm² zu erwarten ist, wenn in der wenig verformungsfähigen WEZ bei $R_{m(HAZ)} = 250$ N/mm² bereits der Bruch eintritt. Ähnliche Überlegungen sind in der Neufassung der DIN 4113 bei der Berechnung der Tragfähigkeit von Querschnitten mit entfestigten Teilbereichen berücksichtigt.

Bei Bruchart 3 müssen dagegen die den Bruch in der WEZ verursachenden Spannungskomponenten σ_{II} und τ_{III} in einer zutreffenden „Bruchhypothese“ entsprechende Bewertung

finden. Zur empirischen Ermittlung unter Verwendung der Ergebnisse aus Tafel 2 dient die vereinfachte Beziehung

$$R_{m(HAZ)} \leq \sigma_c = \sqrt{\sigma_L^2 + \lambda \tau_{II}^2}$$

aus der sich mit den Randwerten für Stumpfnahthproben ($\alpha = 90^\circ$) mit $\tau_{II} = 0$; $\sigma_L = R_{m(HAZ)} = 250 \text{ N/mm}^2$ und Schubproben mit $\sigma_L \sim 0$; $\tau_{II} = S_{m(HAZ)} = 158 \text{ N/mm}^2$ der Wert

$$\lambda = \left(\frac{250}{158}\right)^2 = 2,5$$

errechnet. In der Bruchbedingung für die Wärmeeinflußzone

$$\sqrt{\sigma_L^2 + 2,5 \tau_{II}^2} = 250 \text{ N/mm}^2$$

bleiben die nicht kraftübertragenden Spannungskomponenten σ_{II} unberücksichtigt, wie dies in vergleichbarem Zusammenhang als zulässige Annahme nachgewiesen wurde⁶⁾. Im übrigen zeigen die vorher erwähnten Ergebnisse der Experimente, daß die bei Berücksichtigung von σ_{II} z. B. durch Einführen einer Beziehung

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_L^2 - \sigma_L \sigma_{II} + \sigma_{II}^2 + 3 \tau_{II}^2}$$

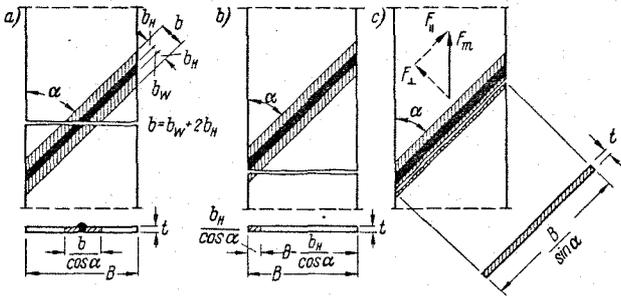
sich ergebende Invarianz der Bruchlasten bei Veränderung der Nahthneigung α unzutreffend ist.

Mit Hilfe der empirisch bestimmten Eingangsdaten (Materialkennwerte, Breite der WEZ) und der weitergehenden Vorbedingungen (Verträglichkeit, Bruchkriterien) konnten die folgenden Beziehungen zur Berechnung der Tragfähigkeit einer Stumpfschweißverbindung mit veränderlicher Neigung α zur Krafrichtung aufgestellt werden, wobei für Bruchart 1 auch der vorhandene zusätzliche Flächenanteil ΔA_w der Nahthüberhöhung zu berücksichtigen war.

Bruchart 1 (Bild 8a):

$$B \geq \frac{b}{\cos \alpha}$$

$$F_m^{(1)} = \frac{(b \cdot t + \Delta A_w)}{\cos \alpha} \cdot R_{m(HAZ)} + \left(B - \frac{b}{\cos \alpha}\right) t \cdot R_p(UM) \quad (1)$$



Bilder 8a bis c: Geometrische Zusammenhänge zur rechnerischen Auswertung; Bruchart 1 (Bild 8a), Bruchart 2 (Bild 8b), Bruchart 3 (Bild 8c)

Tafel 4: Gegenüberstellung der Ergebnisse aus Rechnung und Versuch

Beispiel: B = 60 mm	A _w = 19,1 mm ²	b = 30 mm
t = 3,94 mm	b _w = 10 mm	R _{m(HAZ)} = 250 N/mm ²
A = 236,4 mm ²	b _H = 10 mm	R _{p(UM)} = 320 N/mm ²

Nahthwinkel α in °	Rechnerische Bruchlast $F_{m(th)}$, ermittelt nach den Formeln (1) bis (3)			Bezogene rechn. Tragfähigkeit $R_{m(th)}^* = \frac{F_{m(th)}}{A}$ in N/mm ²	Versuchsergebnis nach Tafel 3 $R_{m(exp)}^* = \frac{F_{m(exp)}}{A}$ in N/mm ²
	Bruchart 1 Gleichung (1) in kN	Bruchart 2 Gleichung (2) in kN	Bruchart 3 Gleichung (3) in kN		
0	72,15	72,89	-	305	308
30	71,61	72,46	81,08	303	301
35	71,38	72,28	72,74	302	(301)
40	71,08	72,05	67,05	284	(283)
45	70,70	71,75	63,18	267	269
60	68,65	70,13	58,20	246	256
75	(77,55)	64,99	58,32	247	259
90	-	-	59,10	250	256

$$B < \frac{b}{\cos \alpha}$$

$$F_m^{(1)} = \left(B \cdot t + \frac{\Delta A_w}{\cos \alpha}\right) \cdot R_{m(HAZ)} \quad (1a)$$

$$R_{m^{(1)}}^* = \frac{F_m^{(1)}}{B \cdot t} = \frac{F_m^{(1)}}{A}$$

Bruchart 2 (Bild 8b):

$$B \geq \frac{b_H}{\cos \alpha}$$

$$F_m^{(2)} = \frac{b_H \cdot t}{\cos \alpha} \cdot R_{m(HAZ)} + \left(B - \frac{b_H}{\cos \alpha}\right) t \cdot R_p(UM) \quad (2)$$

$$B < \frac{b_H}{\cos \alpha}$$

$$F_m^{(2)} = B \cdot t \cdot R_{m(HAZ)} \quad (2a)$$

$$R_{m^{(2)}}^* = \frac{F_m^{(2)}}{B \cdot t} = \frac{F_m^{(2)}}{A}$$

Bruchart 3 (Bild 8c):

$$F_L = F_m \sin \alpha \quad \sigma_L = \frac{F_L}{A_L} = \frac{F_m \sin^2 \alpha}{B \cdot t}$$

$$F_{II} = F_m \cos \alpha \quad \tau_{II} = \frac{F_{II}}{A_{II}} = \frac{F_m \sin \alpha \cos \alpha}{B \cdot t}$$

$$A_L = A_{II} = \frac{B \cdot t}{\sin \alpha}$$

$$R_{m(HAZ)} = \sigma_c = \sqrt{\sigma_L^2 + 2,5 \tau_{II}^2} = \frac{F_m^{(3)}}{B \cdot t} \sqrt{\sin^4 \alpha + 2,5 (\sin \alpha \cos \alpha)^2}$$

$$F_m^{(3)} = \frac{R_{m(HAZ)} \cdot B \cdot t}{\sqrt{\sin^4 \alpha + 2,5 (\sin \alpha \cos \alpha)^2}} \quad (3)$$

$$R_{m^{(3)}}^* = \frac{F_m^{(3)}}{B \cdot t} = \frac{R_{m(HAZ)}}{\sqrt{\sin^4 \alpha + 2,5 (\sin \alpha \cos \alpha)^2}}$$

Bei Bewertung einer Verbindung wird selbstverständlich der jeweils niedrigste der für die Brucharten 1 bis 3 errechneten Werte F_m als Tragfähigkeit maßgebend, wodurch gleichzeitig eine Aussage über die zu erwartende Bruchform ermöglicht wird. Das nachfolgend in Tafel 4 erläuterte Beispiel zeigt die rechnerische Ermittlung der maßgebenden Traglasten für Proben der Breite $B = 60 \text{ mm}$ und die Gegenüberstellung der im Versuch ermittelten vergleichbaren Ergebnisse.

In entsprechenden Rechengängen wurden für alle übrigen Proben die zu erwartenden Bruchlasten und Bruchformen mit ausgezeichneter Übereinstimmung zu den Versuchser-

gebissen ermittelt. In sämtlichen Fällen erfolgte der Bruch in der vorhergesagten Lage, bei nur 3 Proben wich die tatsächlich erreichte Traglast um mehr als 5% vom rechnerisch bestimmten Wert ab.

In den Bildern 9 und 10 sind zum Vergleich die auf die Probenabmessung bezogenen Bruchlasten aus Versuch und Berechnung in Abhängigkeit von der Nahtneigung α aufge-

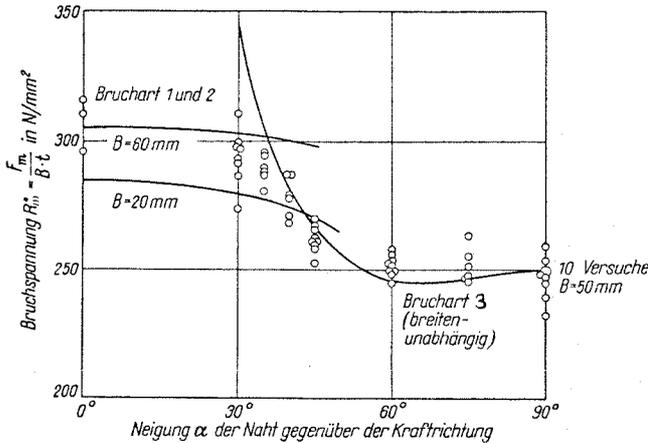


Bild 9: Abhängigkeit der Bruchspannung R_m^* von der Neigung α der Schweißnaht für schmale Proben ($B \leq 60$ mm); O Versuchswerte, Kurven sind Rechenergebnisse

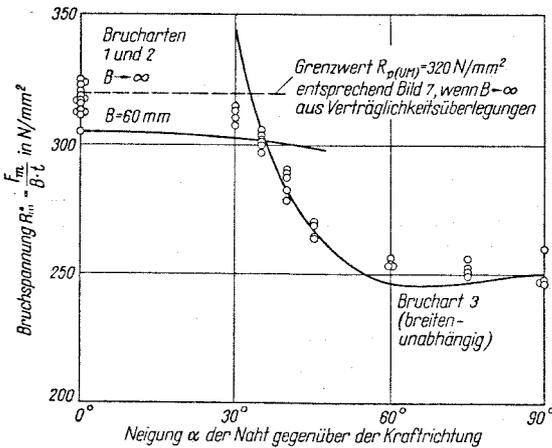


Bild 10: Abhängigkeit der Bruchspannung R_m^* von der Neigung α der Schweißnaht für breite Proben ($B > 60$ mm); O Versuchswerte, Kurven sind Rechenergebnisse

tragen. Da bei den Bruchformen 1 und 2 der Vergleichswert R_m^* von der Probenbreite B beeinflusst wird, sind die Ergebnisse vergleichsweise „schmäler“ ($B \leq 60$ mm) und breiter ($B > 60$ mm) Proben getrennt dargestellt. Die graphische Gegenüberstellung macht die gute Übereinstimmung der Versuchs- und Rechenergebnisse augenfällig.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Untersuchungen an über 120 Einzelproben haben erwiesen, daß dem durch geschweißte Stöße und Anschlüsse (Entfestigung) verursachten ungünstigen Effekt der Tragfähigkeitsverminderung von Konstruktionsteilen aus Aluminiumlegierungen erfolgreich begegnet werden kann. Der Einfluß der konstruktiven Maßnahme, die Schweißnähte schräg zur Krafttrichtung anzuordnen, läßt sich für vorwiegend ruhend beanspruchte Bauteile bei Kenntnis der Eingangswerte in einem übersichtlichen Rechengang zutref-

Tafel 5: Ergebnis der Versuche unter wechselnder Beanspruchung

Nahtwinkel α in $^\circ$	Probenanzahl	Erreichte Lastspielzahl N (Mittelwert)
90	3	$82 \cdot 10^3$
60	3	$183 \cdot 10^3$
30	3	$362 \cdot 10^3$

end nachvollziehen und bei einer Dimensionierung – zum Beispiel für schräg einlaufende Fachwerkstäbe und Rohrknotenverbindungen – gezielt nutzen.

In einigen Tastversuchen wurden ähnlich ausgebildete Proben des gleichen Materials wechselnder Belastung unterworfen. Die bei je 3 Proben gleicher Breite ($B = 40$ mm) für 3 Versuchsgruppen erreichten mittleren Lastspielzahlen [$\sigma_0 = 130$ N/mm² ($\sim 0,5 R_m$ (HAZ)), $\sigma_u = 13$ N/mm²] sind in Tafel 5 aufgeführt. Wenn diesen wenigen Ergebnissen auch keine zu hohe Aussagefähigkeit zugestanden werden darf, lassen sie doch erwarten, daß bei dynamisch beanspruchten Konstruktionsteilen der durch die Veränderung der Nahtneigung – wenn auch aus anderen Gründen als bei ruhender Belastung – erzielbare günstige Effekt in verstärktem Maße zu nutzen sein dürfte. Ein entsprechendes weitergehendes Forschungsvorhaben wird an der FMFA-Bauwesen durchgeführt¹⁾. In Kürze dürften die ersten Ergebnisse und Bewertungen vorliegen. Als Beispiel lassen sich dann für die bei Aluminiumkonstruktionen des Fahrzeug- und Gerätebaues an Verbindungen von massiven Formteilen mit dünnwandigen Plattenelementen oftmals zu findenden „Keilverzinkungen“ wohl bezüglich der Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit ebenfalls befriedigendere Lösungsvorschläge erwarten.

Zusammenfassung

Zur experimentellen Ermittlung des Einflusses der Nahtlage auf die Tragfähigkeit von Stumpfschweißungen wurden Versuche mit geschweißten Blechen aus AlMgSi1 (Zusatzwerkstoff: S-AISI5) durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, daß die an geschweißten Vollstößen ermittelte Tragfähigkeitseinbuße von 28% gegenüber dem ungestörten Grundmaterial sich durch entsprechende Nahtanordnung teilweise kompensieren läßt; bei 30° Nahtneigung z. B. konnte für breitere Proben die Traglast um 25% gesteigert werden. Um diese Ergebnisse einer Rechnung zugänglich zu machen, wurde ein empirisches Verfahren für jede der drei im Versuch beobachteten typischen Bruchformen entwickelt. Der Vergleich zwischen Rechnung und Versuch weist eine gute Übereinstimmung auf. Erste Vorversuche lassen den Schluß zu, daß diese für ruhende Belastung gefundenen Ergebnisse für wechselnde Belastung zumindest qualitativ gültig sind.

Die Untersuchungen wurden vom Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau gefördert.

Schrifttum

- ¹⁾ Kosteas, D.: Geschweißte Aluminiumkonstruktionen. 1. Auflage, Vieweg-Verlag, Braunschweig 1978, S. 25 ff., 80 ff.
- ²⁾ Anon.: Aluminium-Taschenbuch. 13. Auflage, Aluminium-Verlag, Düsseldorf 1974, S. 849.
- ³⁾ Paton, E. O., Kozlowsky und Schewernitzki: Verstärkte geschweißte Stöße von Blechen. Der Stahlbau 6 (1933) 1, S. 6.
- ⁴⁾ Graf, O.: Über die Dauerfestigkeit von Schweißverbindungen. Der Stahlbau 6 (1933) 12/13, S. 89.
- ⁵⁾ Graf, O.: Über die Festigkeit der Schweißverbindungen. Autogene Metallbearbeitung 27 (1934) 1, S. 1.
- ⁶⁾ Bornscheuer, F. W., und G. Werner: Statische und dynamische Untersuchungen an geschweißten Biegeträgern. Schweißen und Schneiden 26 (1974) 2, S. 37.
- ⁷⁾ Harre, W., und H. Schmidt: Festigkeitseigenschaften zweiachsig beanspruchter Stumpfnahverbindungen an Aluminiumverbindungen. Forschungsvorhaben DVS/AIF 9.086 (unveröffentlicht).

III. Schlußbemerkungen

Die statischen Untersuchungen zum Forschungsvorhaben "Aluminium-Schweißverbindungen" (B II 5 - 80 Ol 74 - 51), das mit Schreiben vom 7.11.1974 vom Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau der Amtlichen Forschungs- und Materialprüfungsanstalt für das Bauwesen (FMFA-Bauwesen), Otto-Graf-Institut, Abteilung für Stahl und Stahlbeton, Universität Stuttgart bewilligt wurde, konnten im Oktober 1980 abgeschlossen werden. Bei beiden Programmteilen (GZ und W) ist die im Auftrag vorgegebene und in der Einleitung nochmals erläuterte Zielsetzung der Untersuchungen erreicht worden, so daß eine Weiterführung an dynamisch beanspruchten Schweißverbindungen in der geplanten Weise Erfolg verspricht. Ein entsprechender Fortsetzungsantrag für Teil GZ wird zu gegebener Zeit durch die Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg gestellt, weitergehende Untersuchungen zu Programmteil W sind bereits im Gange.

Die Schlußfolgerungen des vorliegenden Berichtes lassen erwarten, daß die Ergebnisse des Forschungsvorhabens bei Ausarbeitung und Weiterentwicklung des für geschweißte Aluminiumkonstruktionen geltenden Regelwerks auf nationaler (DIN, DVS) und internationaler (ECCS, IIW, ISO) Ebene in absehbarer Zeit entsprechende Berücksichtigung finden werden.



(Dr.-Ing. G. Werner)



(Prof. Dr.-Ing. H. Schmidt)

Literaturhinweise

- /1/ Aluminiumkonstruktionen unter vorwiegend ruhender Belastung - Geschweißte Konstruktionen, Berechnung und bauliche Durchbildung, Entwurf DIN 4113, Teil 2 (Mai 1980)
- /2/ Aluminiumkonstruktionen unter vorwiegend ruhender Belastung - Berechnung und bauliche Durchbildung, DIN 4113, Teil 1 (Mai 1980)
- /3/ Werner, G.: A New Type of Specimen for Testing Side Fillet Welds, Institut für Baustatik, Universität Stuttgart, 1972, IIW - Doc. XV - 327-72
- /4/ Feder, D.: Recommended Practice for Testing the Strength of Fillet Welds in Structural Steels and Aluminium Alloys, IIW- Doc. XV-439-79
- /5/ Werner, G.: Tests on Welded Connections of Aluminium Alloys, Final Report, IIW - Doc. XV-328-72, Institut für Baustatik, Universität Stuttgart
- /6/ Werner, G. und F.W. Bornscheuer: Bewertung der Festigkeit vorwiegend ruhend beanspruchter Kehlnahtschweißverbindungen, Schweißen und Schneiden 30 (1978)
- /7/ Werner, G. und F.W. Bornscheuer: Vergleichende Untersuchungen an Schweißverbindungen der Stahlsorten StE 36, StE 51, StE 70, Schlußbericht FMPA und Institut für Baustatik, Universität Stuttgart, zum Forschungsvorhaben AIF 3881
- /8/ Feder, D. und G. Werner: Ansätze zur Traglastberechnung von Schweißverbindungen des Stahlbaues, Schweißen und Schneiden 29 (1977), Heft 4

- /9/ Richtlinien für den Nachweis der Befähigung zum Schweißen von tragenden Aluminiumbauteilen und die Ausstellung des Befähigungsausweises, Mitteilungen 5 (1972) des Instituts für Bautechnik, Berlin, sowie Erläuterungen von U. Einsfeld, ALUMINIUM 49 (1973), Heft 2
- /10/ Pirner, J.: Zum Verhalten des Werkstoffes AlZn_{4,5}Mg₁ Aluminium-Tag 1980, Mitteilungen des Instituts für Stahlbau, TU München, erscheint demnächst
- /11/ Zulassungsuntersuchungen der FMPA Stuttgart - Nachweis der Befähigung zum Schweißen von tragenden Aluminiumbauteilen: Diverse Prüfungsberichte
- /12/ Kosteaş, D.: Geschweißte Aluminiumkonstruktionen, 1. Auflage, Vieweg-Verlag, Braunschweig 1978
- /13/ Berechnungskonzepte als Vorlage für den Arbeitsausschuß DIN 4113, Teil 2, Februar 1975
- /14/ European Recommendation for Aluminium Alloy Structures, First Edition 1978, ECCS Committee T 2
- /15/ Werner, G.: Verbesserung der Tragfähigkeit von Aluminium-Schweißverbindungen, ALUMINIUM 55 (1979), Heft 10

Materialbezeichnung Bez.	Legierung nach DIN 1725	Ab- messung t mm	Mech. Kennwerte Soll DIN 1715 Ist (Tabelle)		Legierungsbestandteile (Analyse) in %								Bemerkungen
			$\beta_{0,2}$ N/mm ²	β_Z N/mm ²	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
A	AlZn _{4,5} Mg ₁ F 35	8,2	275 304	350 346	0,25	0,21	0,01	0,40	1,2	4,4	0,01	0,17	verwendet für Programm GZ
B	AlMgSi ₁ F 32	7,9	255 300	315 325	1,05	0,30	0,04	0,33	0,80	0,02	0,02	0,02	
F	AlMg ₃ F 24	7,8	160 171	240 252	0,16	0,25	0,01	0,31	2,6	0,01	0,01	<0,01	
B ⁺	AlMgSi ₁ F 32	4,0	255 317	315 344	1,10	0,31	0,03	0,35	0,79	0,02	0,01	<0,01	verwendet für Programm W

Tabelle 1: KENNWERTE DER GRUNDMATERIALIEN

Materialbezeichnung Bez.	Legierung, Hersteller	Ab- messung \varnothing mm	Mech. Kennwert Rm		Legierungs-Richtwerte (Herstellerangabe) in %								Bemerkungen
			Soll DIN 1732 N/mm ²	Ist (Tab.) N/mm ²	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	S-AlMg ₃ (bzw. 3,5) (5154) All State	1,6	177	211	D ¹⁾	D	0,10	0,10	3,1 3,9	0,20	0,20	0,15 0,35	Programm GZ
2	S-AlMg ₅ All State (5356) Alcoa	1,6 1,2	275	292	-	<0,5	0,10	0,05 0,20	4,5 5,5	0,10	0,06 0,20	0,05 0,20	
3	S-AlMg _{4,5} Mn (5183) All State	1,6	275	299	(0,40)	0,40	0,10	0,5 1,0	4,3 5,2	0,25	0,15	0,05 0,25	
4	S-AlSi ₅ (4043) All State	1,6 1,2	186	200	4,5 6,0	0,8	0,30	0,05	0,05	0,10	0,20	-	

Tabelle 2: KENNWERTE DER ZUSATZWERKSTOFFE

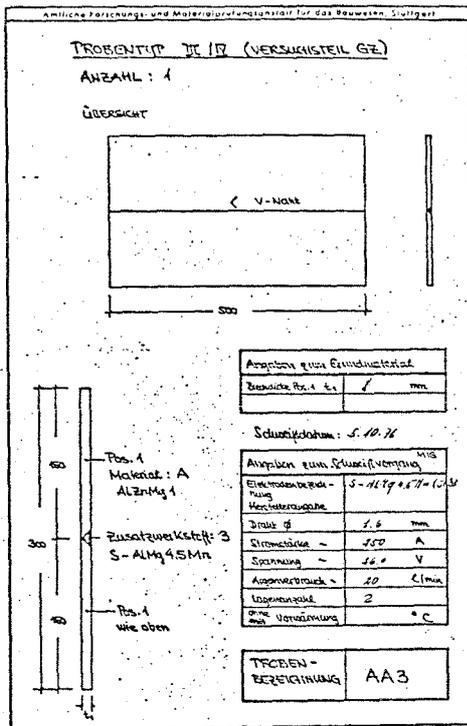
1) D - Fe + Si < 0,45

Materialbezeichnung	Proben-		Abmessungen		Mechanische Kennwerte				Bemerkungen
	Bez.	Nr.	Dicke t mm	Breite b mm	Rp 0,2 N/mm ²	Rm N/mm ²	A 50 %	E N/mm ²	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
AlZnMg 1 (F36) wa A	A - l	1	8,17	20,0	304	346	-	72100	
		2			304	347	-		
		3			305	347	-		
	A - q	1	8,16	20,0	316	357	14,6	75400	
		2			315	356	16,0		
		3			315	355	14,0		
AlMgSi 1 (F32) wa B	B - l	1	7,85	20,0	299	325	-	71000	
		2			300	325	-		
		3			300	325	-		
	B - q	1	7,86	20,1	290	326	15,0	72900	
		2			290	325	14,4		
		3			291	325	14,0		
AlMg 3 (F23) hh F	F - l	1	7,75	20,0	171	254	-	71200	
		2			169	243	-		
		3			173	258	-		
	F - q	1	7,75	20,1	166	240	26,0	73100	
		2			165	254	28,0		
		3			166	256	-		

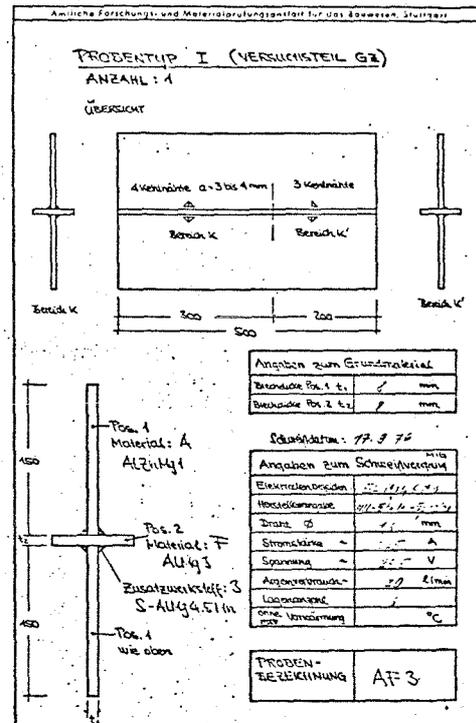
Tabelle 3: ERGEBNISSE DER GRUNDMATERIALUNTERSUCHUNGEN AN LÄNGS- UND QUERPROBEN

Probenbezeichnung		Werkstoffangaben			Schweißdatum	Schweißverfahren und Parameter				
Bez.	Grundwerkstoff Bleche	Zusatzwerkstoff	Ø mm	Verfahren		Stromstärke A	Spannung V	Argonverbrauch l/min	Lagenanzahl	
B 1 F 1	B F	B F	S-AlMg3(5154) All-State	1,6	5.10.76	MIG	250	26,5	20	2
A 2 B 2 F 2	A B F	A B F	S-AlMg5(5356) All-State	1,6	5.10.76	MIG	250	26,5 26 26,5	20	2
A 3 B 3 F 3	A B F	A B F	S-AlMg4,5 Mn (5183) All-State	1,6	5.10.76	MIG	250	26	20	2
B 4	B	B	S-AlSi5(4043) All-State	1,6	5.10.76	MIG	250	26,5	20	2

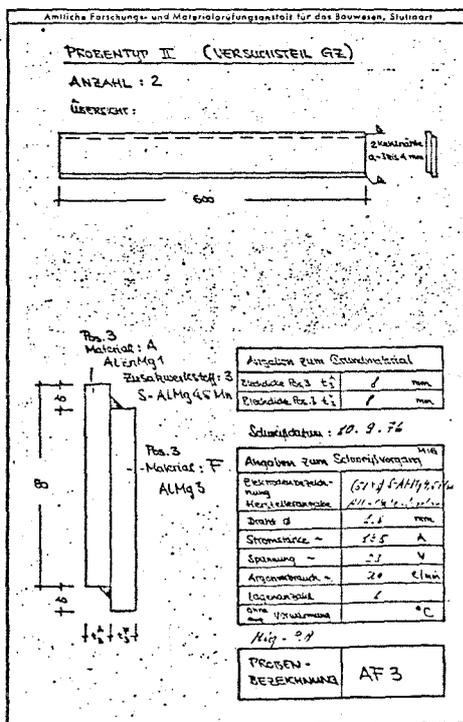
Tabelle 4: ANGABEN ZUR HERSTELLUNG DER STUMPFGESCHWEISSTEN PROBEN TYP III (entsprechend Bild 1 und 2)



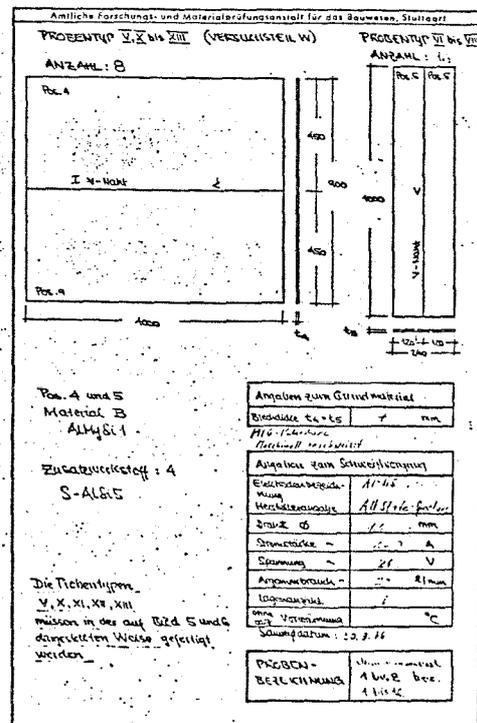
Programnteil GZ: Stumpfnahverbindung



GZ: Stirnkehlnahverbindung



GZ: Flankenkehlnahverbindung



Programnteil W: Stumpfnahverbindung

Bild 1: AUSGEFÜLLTE MUSTERPROTOKOLLE DER PROBENFERTIGUNG

Probenbezeichnung			Werkstoffangaben		Schweißdatum	Schweißverfahren und Parameter				
Bez.	Grundwerkstoff		Zusatzwerkstoff	Ø mm		Verfahren	Stromstärke A	Spannung V	Argonverbrauch l/min	Lagenanzahl
	Pos.1	Pos.2								
BB 1 FF 1 AF 1	B F A	B F F	S-AlMg3 (5154) All-State-Spoolarc	1,6	15.9.76	MIG	225 220 220	25,5 25,5 26	20	1
AA 2 BB 2 FF 2 AB 2 AF 2	A B F A A	A B F B F	S-AlMg 5 All-State-Spoolarc	1,6	16.9.76	MIG	225 225 220 225 225	25,5 26 25,5 25,5 25,5	20	1
AA 3 BB 3 FF 3 AB 3 AF 3	A B F A A	A B F B F	S-AlMg4,5Mn All-State-Spoolarc	1,6	17.9.76	MIG	225 220 225 220 225	26 25,5 25,5 26 25,5	20	1
BB 4 AB 4	B A	B B	S-AlSi5 (4043) All-State-Spoolarc	1,6	15.9.76 16.9.76	MIG	240 230	26 25,5	20	1

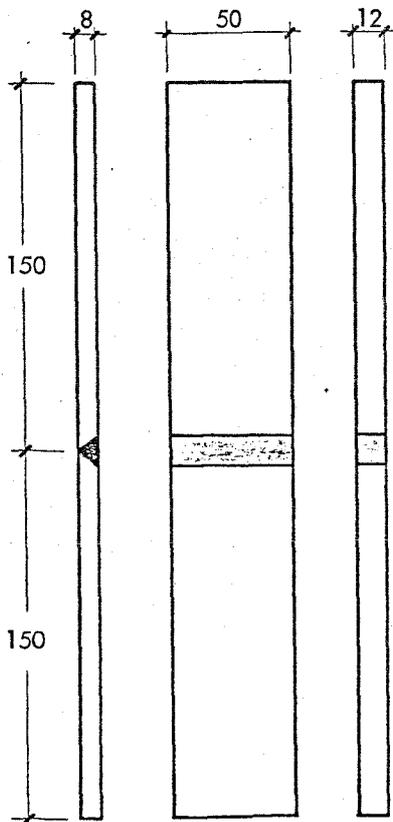
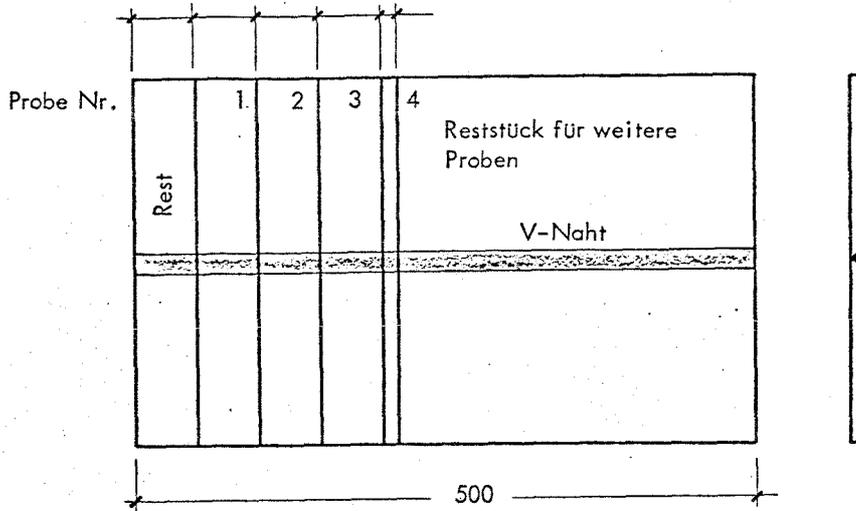
Tabelle 5: ANGABEN ZUR HERSTELLUNG DER "KREUZPROBEN" TYP I (entsprechend Bild 1 und 3)

Probenbezeichnung			Werkstoffangaben		Schweißdatum	Schweißverfahren und Parameter				
Bez.	Grundwerkstoff		Zusatzwerkstoff	Ø mm		Verfahren	Stromstärke A	Spannung V	Argonverbrauch l/min	Lagenanzahl
	Bleche									
BB 1 FF 1 AF 1	B F A	B F F	S-AlMg3,5(5154) All-State-Spoolarc	1,6	13.9.76	MIG pulsed-arc	200/210 210/220 200/210	23 23 23	20	1
AA 2 BB 2 FF 2 AB 2 AF 2	A B F A A	A B F B F	S-AlMg5 Alcoa	1,2	7.9.76 8.9.76 8.9.76 7.9.76 8.9.76	MIG	180	32 24,5 24,5 25 24,5	20	1
AA 3 BB 3 FF 3 AB 3 AF 3	A B F A A	A B F B F	S-AlMg4,5 Mn (5183) All-State-Spoolarc	1,6	10.9.76	MIG pulsed-arc	195 195 200 200 195	23	20	1
BB 4 AB 4	B A	B B	S-AlSi5 (4043) All-State-Spoolarc	1,2	7.9.76	MIG	180	25 24,5	20	1

Tabelle 6: ANGABEN ZUR HERSTELLUNG DER FLANKENNAHTPROBEN TYP II (entsprechend Bild 1 und 4)

Trennen der Schweißproben Typ III in Einzelversuchsstücke

3 Proben Typ III.a 1 Probe Typ III.b (Feindehnungsmessung)
 b = 50 mm b = 12 mm



Einzelversuchsstück Typ III.a Typ III.b

Bei Herstellung der Stumpfnahtverbindungen Probentyp III in Anlehnung an DIN 50120 wurden Grund-Zusatzwerkstoffkombinationen gewählt, die aus der Probenbezeichnung erkennbar sind.

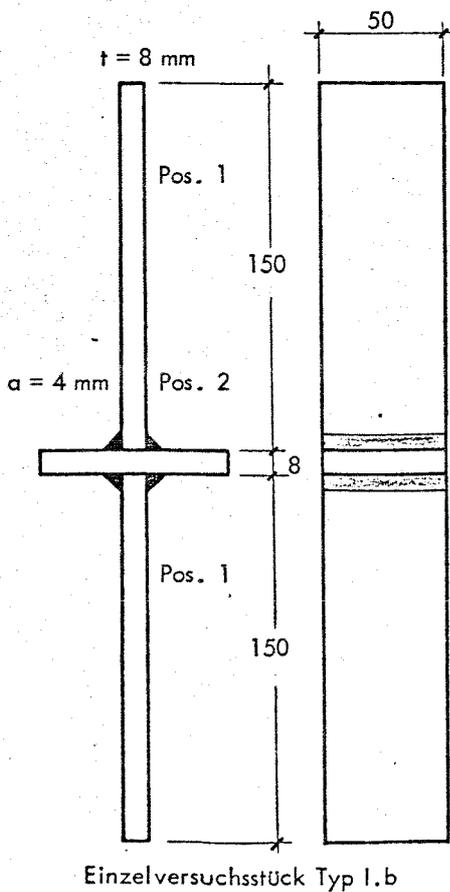
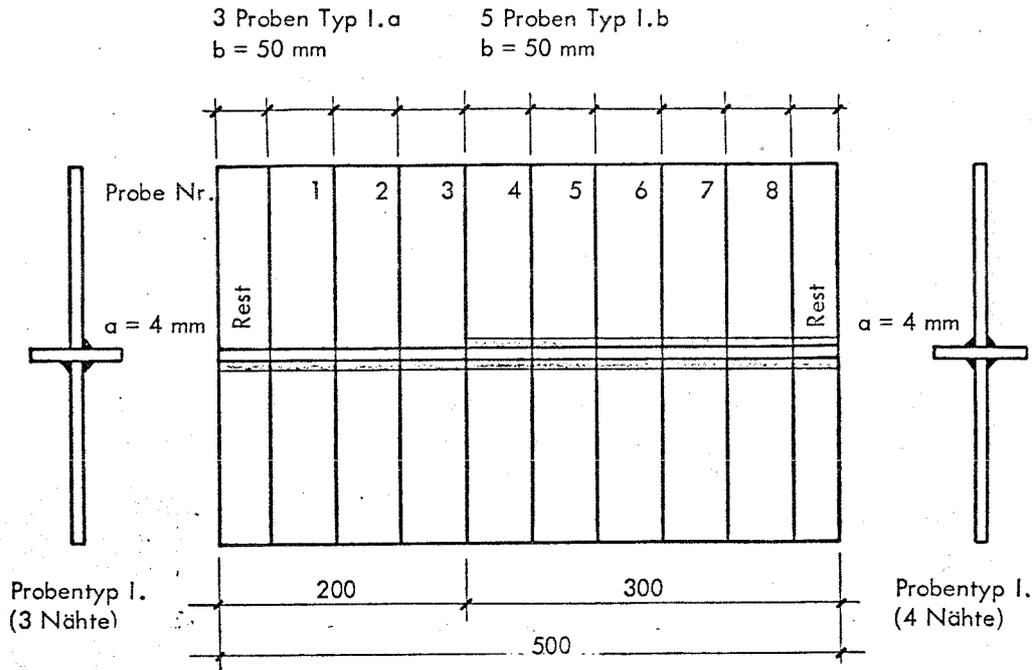
Entsprechend dem Musterprotokoll (Anlage 3) bedeutet beispielsweise

AA 3
 (kurz A3

Bleche aus Material A = AlZn4,5MgI mit
 Zusatzwerkstoff 3 = S-AlMg4,5Mn
 verschweißt.

Bild 2: HERSTELLUNG UND ABMESSUNG DER EINZELVERSUCHSSTÜCKE AUS DEN STUMPFGESCHWEISSTEN PROBEN

Trennen der Schweißprobe Typ I in Einzelversuchstücke



Bei Herstellung der Kreuzproben in Anlehnung an DIN 50126 wurden Grundwerkstoffkombinationen (unterschiedliche Materialien für Pos. 1 und Pos. 2) mit verschiedenen Zusatzwerkstoffen verschweißt.

Grund- und Zusatzwerkstoff sind aus der Probenbezeichnung erkennbar.

Entsprechend dem Musterprotokoll (Anlage 3) bedeutet beispielsweise

AF 3

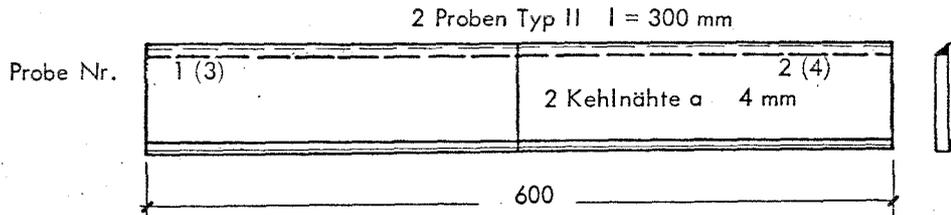
Pos. 1 Material A = AlZn4,5Mg1

Pos. 2 Material F = AlMg3

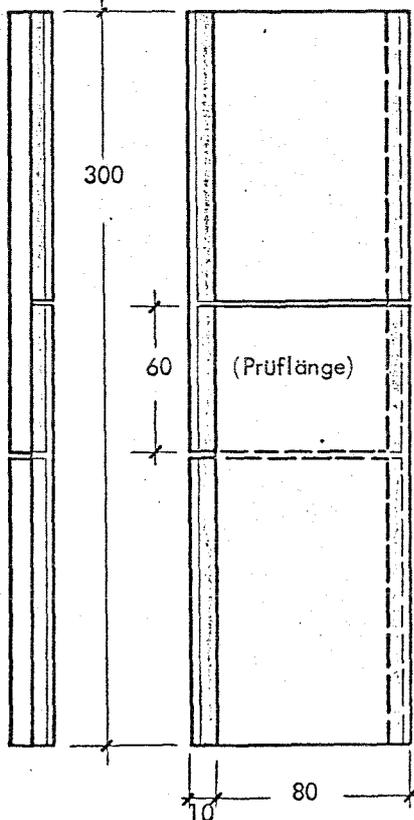
Zusatzwerkstoff 3 = S-AlMg4,5Mn

Bild 3: HERSTELLUNG UND ABMESSUNG DER EINZELVERSUCHSSTÜCKE AUS DEN "KREUZPROBEN" (Stirnkehlnähte)

Trennen der Schweißproben Typ II in Einzelversuchsstücke



Einzelversuchsstück Typ II



Bei Herstellung der Flankenkehlnahtverbindungen Probentyp II in Anlehnung an entsprechende IIW-Empfehlungen / . / wurden Grundwerkstoffkombinationen (unterschiedliche Materialien für die beiden zu verschweißenden Bleche) mit verschiedenen Zusatzwerkstoffen verschweißt.

Grund- und Zusatzwerkstoff sind aus der Probenbezeichnung erkennbar.

Entsprechend dem Musterprotokoll (Anlage 3) bedeutet beispielsweise

AF 3

Blech aus Material A = AlZn4,5Mg1 und
Blech aus Material F = AlMg3 mit

Zusatzwerkstoff 3 = S-AlMg4,5Mn
verschweißt.

Bild 4: HERSTELLUNG UND ABMESSUNG DER EINZELVERSUCHSSTÜCKE AUS DEN SONDERPROBEN (Flankenkehlnähte)

Probenbez.		Breite der Probe mm	Mechanische Kennwerte (Zugversuch)				Bruchlage		Bemerkungen
Gruppe	Nr.		Rp 0,2 (50) N/mm ²	Rm (B/W) N/mm ²	Rm (N) N/mm ²	A 50 %	Art	Abstand Nahtm. mm	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A 2	1	51,5	185	319	294 290	11 9	B	20	Prüf. n. 2 Mon. " " 2 Jahr.
	3	50,4		(341)			B	26	
	2	50,8		N			0		
	4	12,1		N			0		
A 3	1	51,2	187	319	(>309) 299	10 9	B	28	Prüf. n. 2 Mon. " " 2 Jahr.
	3	50,4		(343)			B	26	
	2	51,0		321			B	30	
	4	12,0		N			0		
B 1	1	50,1	133	223	(223) (>212) (>213)	11 11	Ü	6	2 M. Störstelle 2 J.
	3	49,5		227			W	15	
	2	50,1		224			W	15	
	4	11,9		214			W	15	
B 2	1	50,0	131	233		10 11	W	15	2 M. 2 J.
	3	51,1		229			W	15	
	2	50,6		223			W	15	
	4	12,2		214			W	15	
B 3	1	50,2	133	226		10 11	W	15	2 M. 2 J.
	3	49,6		229			W	15	
	2	51,3		224			W	17	
	4	12,2		212			W	15	
B 4	1	50,0	127	223	(204) (213)	10 11	W	17	2 M. 2 J.
	3	49,9		229			W	17	
	2	50,3		221			W	17	
	4	12,0		214			W	15	
F 1	1	50,3	107	229	(>207) 211	18 21	B	15	2 M. 2 J.
	3	50,3		232			B	15	
	2	50,2		219			B	15	
	4	12,0		N			0		
F 2	1	50,5	117	229		18 18	B	15	2 M. 2 J.
	3	50,8		227			B	15	
	2	50,3		225			B	15	
	4	11,9		221			B	12	
F 3	1	50,6	113	229		17 18	B	15	2 M. 2 J.
	3	50,7		225			B	15	
	2	50,6		224			B	15	
	4	12,0		222			B	12	

Tabelle 7: ZUSAMMENSTELLUNG DER ERGEBNISSE FÜR STUMPFNAHTVERBINDUNGEN (Bild 2, Nahtüberhöhung der Proben 2 und 4 abgearbeitet)

Gruppen- bezeich- nung	Mechanische Kennwerte des Grundmaterials			Mechanische Kennwerte der geschweißten Verbindung				Bemerkungen
	Rp 0,2	Rm	A50	Rp 0,2 (50 mm)	Rm (B/W)	Rm (N)	A50	
	N/mm ²	N/mm ²	%	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
A 2 A 3	304	346	15	186	319	292 304	10	Spalte 6 Rm (B/W) = 342 N/mm ² nach 2 Jahren
B 1 B 2 B 3 B 4	300	325	14	131	225	- - - -	11	Spalte 6 Rm = 214 N/mm ² bei b = 12 mm
F 1 F 2 F 3	171	252	27	112	226	211 - -	18	

Tabelle 8: GEGENÜBERSTELLUNG DER ERGEBNISSE FÜR GRUNDMATERIAL
UND STUMPFNAHTVERBINDUNG (Tabellen 3 und 7)

Proben-bez.		Probenabmessung			Ergebnis des Zugversuches					$\Delta a - a - a^*$ mm	Beurteilung der Bruch-fläche			rechn. Nahtbean-spruchung b. Bruch max $P/a \cdot l$ ($\sigma_{3,6,6}$) N/mm ²		rechn. Nahtbean-spruchung b. Bruch max $P/a \cdot l$ ($\sigma_{3,6,6}$) N/mm ²	
Gr.	Nr.	Breite b mm	Nahtdicke a mm		Bruchlast max P kN	Neigung d. Bruchfläche Altgrad		mittl. Breite \bar{a} d. Bruchfläche mm			Naht-wurzel	Poren	Binde-fehler	Einzelw.	Mittelw.	Einzelw.	Mittelw.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
BB 1	1	51,0	5,9		19,8	(V)		3,9		(2,0)	-		B	66	77	100	110
	2	51,1	5,9		26,0			4,4		1,5	-		b	86		115	
	3	52,8	5,7		26,4			4,3		1,4	-		b	80		116	
FF 1	1	51,0	5,9		23,7	(V)		4,0		1,9	-		B	78	83	116	114
	2	50,5	5,6		25,4			4,2		1,4	-		b	90		121	
	3	51,7	6,3		26,1			4,8		1,5	-			80		105	
AF 1	1	49,2	5,4		26,0	(V)		3,8		1,6	-		B	114	117	161	157
	2	50,0	5,6		33,9			4,3		1,3	-			122		157	
	3	51,7	6,2		36,7			4,7		1,5	-		b	114		152	
AA 2	1	51,1	6,2		28,2	(V)		5,3		0,9	-		b	89	98	105	115
	2	49,5	6,2		32,7			5,1		1,1	-			106		129	
	3	50,8	6,6		33,2			5,8		0,8	-			99		112	
BB 2	1	51,2	6,0		17,6	0		4,6		(1,4)	-		B	58	68	(75)	(98)
	2	51,6	5,8		21,0	0		4,2		(0,6)	-		B	70		(97)	
	3	49,5	5,9		22,6	(V)		3,8		2,1	-		B	77		122	122
FF 2	1	50,5	6,6		25,2	(V)		4,4		2,2	-		B	76	84	114	115
	2	51,5	6,5		28,1			4,8		1,7	-	p		84		114	
	3	51,2	6,7		31,1			5,2		1,5	-	p		91		117	
AB 2	1	51,0	5,9		20,5	0		3,3		(2,6)	-		B	68	90	121	133
	2	49,3	5,6		27,3	(V)		3,9		1,7	-		b	99		142	
	3	51,2	6,1		31,9	(V)		4,6		1,5	-			102		135	
AF 2	1	49,7	6,5		31,5	(V)		4,7		1,8	-		B	99	113	138	152
	2	50,8	6,2		36,5			4,5		1,7	-			115		160	
	3	50,1	6,2		38,9			4,9		1,3	-		b	125		159	
AA 3	1	50,8	6,1		27,0	(V)		4,3		1,8	-		b	87	92	123	120
	2	50,1	6,2		28,0			5,1		1,1	-			90		111	
	3	50,4	6,1		30,5			4,8		1,3	-			100		127	
BB 3	1	50,1	6,2		25,2	(V)		4,5		1,7	-		B	81	93	111	119
	2	51,5	6,5		32,0			5,3		1,2	-			96		118	
	3	51,0	6,6		34,0			5,3		1,3	-			101		127	
FF 3	1	51,5	6,5		28,4	50		5,0		1,5	-	P	-	86	87	111	111
	2	49,6	6,5		27,6	60		5,1		1,4	-	P		85		110	
	3	52,2	6,6		30,4	50		5,2		1,4	-	P		89		111	
AB 3	1	51,2	6,3		27,2	0/45		4,2		(2,1)	-		B	84	85	126	(105)
	2	49,9	6,4		27,9	0		5,8		(0,6)	-			88		(97)	
	3	50,7	6,5		27,2	0		5,8		(0,7)	-			82		(92)	126
AF 3	1	51,0	5,9		32,0	(V)		3,7		2,2	-		B	106	114	170	163
	2	51,3	5,6		35,8			4,2		1,4	-			125		168	
	3	50,3	6,0		33,4			4,4		1,6	-			112		151	
BB 4	1	51,0	5,4		21,7	(V)		5,4		-	+	P		79	80	79	80
	2	53,0	5,7		23,6			5,6		0,1	+	P		79		80	
	3	51,5	5,6		23,9			5,8		-	+	P		83		81	
AB 4	1	51,3	6,4		18,7	(V)		5,2		1,2	-			57	61	70	70 ?
	2	50,6	6,1		19,5			5,3		0,8	-			63		72	
	3	50,8	6,1		19,7			5,6		0,5	-			64		69	

Tabelle 9: ZUSAMMENSTELLUNG DER ERGEBNISSE FÜR STIRNKEHLNAHT-VERBINDUNGEN - EINZELNAHT (Probentyp Ia, Bild 3)

Proben-bez.		Probenabmessung			Ergebnis des Zugversuches						Beurteilung der Bruch-fläche			rechn. Nahtbean-spruchung b. Bruch		rechn. Nahtbean-spruchung b. Bruch		Bemerkungen
Gr.	Nr.	Breite b mm	Nahtdicke a mm		Bruchlast max P kN	Neigung d. Bruchfläche Altgrad		mittl. Breite a* d. Bruchfläche mm		$\Delta a = a - a^*$ mm	Naht-wurzel	Poren	Binde-fehler	max $P/\Sigma a \cdot l$ N/mm ²		max $P/\Sigma a^* \cdot l$ N/mm ²		
			Nahtl	Naht r		Naht l	Naht r	Naht l	Naht r					Einzelw.	Mittelw.	Einzelw.	Mittelw.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
BB 1	1	51,0	5,3	5,8	76,0	50	90	4,1	(8,7)	1,2	-			135	137	(162)	173	Bruch in WEZ, Blech I (Bezug 2 x 4,6 mm)
	2	51,1	5,2	5,5	84,9	60	70	4,6	5,1	0,5	-		b	155		174		
	3	52,8	5,7	5,9	88,5	60	80	4,6	4,9	1,1	-		B	145		187		
	4	46,5	4,4 A	4,5 A	50,4	60	80	3,0	3,2	1,4	-		b	122		175		Bruch in WEZ, Blech II
	4	46,5	5,9	5,5	82,2	0	50	6,5	4,3	-	-			155		(192)		
	5	50,0	4,4 A	4,4 A	58,3	80	60	3,8	3,2	0,9	-		b	133		167		
	6	50,6	4,5 A	4,4 A	60,4	80	60	3,8	3,5	0,8	-		b	134		164		
	7	49,5	4,7 A	4,5 A	60,8	80	60	4,0	4,0	0,6	-		B	134		154		
8	50,4	4,6 A	4,6 A	56,3	60	60	3,2	3,0	1,5	-		B	121		180			
FF 1	1	51,0	6,2	5,6	90,9	70	80	5,0	5,1	0,8				151	150	176	191	Blechbruch 236 N/mm ²
	2	50,5	5,9	5,7	93,0	-	-	-	-	-				<160>		-		
	3	51,7	4,9 A	4,1 A	69,0	60	50	3,8	3,5	0,8	-		b	148		184		
	4	46,4	4,6 A	4,5 A	57,5	60	60	3,2	3,2	1,3	-		b	134		191		Blechbruch 227 N/mm ²
	4	46,4	6,2	6,4	82,2	-	-	-	-	-				<141>		-		
	5	50,5	4,5 A	4,5 A	70,8	60	70	3,8	4,2	0,5	-			158		177		
	6	51,5	4,5 A	4,7 A	71,2	60	70	3,5	4,0	0,9	-		B	155		190		
	7	50,8	4,6 A	4,3 A	66,8	60	60	3,4	3,2	1,2	-		b	150		202		
8	50,4	4,6 A	4,3 A	68,2	60	60	3,3	3,0	1,3	-		b	151		214			
AF 1	1	49,2	5,2	5,7	97,1	80	65	5,2	4,4	0,7	-			180	166	206	207	
	2	50,0	4,4 A	4,5 A	69,4	80	45	3,5	3,3	1,1	-			156		206		
	3	51,7	4,1 A	4,7 A	67,4	85	45	3,0	3,2	1,3				150		213		
	4	46,2	5,8	5,7	84,8	60	60	5,0	4,5	1,0				152		193		
	4	46,2	5,9	6,2	96,0	50	70	5,0	5,0	1,1				181		208		
	8	50,5	6,2	6,0	88,8	60	45	4,6	4,2	1,7	-		B	144		200		
	8	50,5	5,8	4,8	105,2	70	60	5,2	4,2	0,6				197		222		

A = Naht abgearbeitet auf Sollmaß 4,5 mm

Tabelle 10: ZUSAMMENSTELLUNG DER ERGEBNISSE FÜR STIRNKEHLNAHTVERBINDUNGEN - DOPPELNAHT (Bild 3)
ZUSATZWERKSTOFF 1 : S-ALMg3 (5154)

Proben- bez.		Probenabmessung			Ergebnis des Zugversuches					Δa $a - a^*$ mm	Beurteilung der Bruch- fläche			rechn. Nahtbean- spruchung b. Bruch max P / $\Sigma a \cdot t$ N/mm ²		rechn. Nahtbean- spruchung b. Bruch max P / $\Sigma a^* \cdot t$ N/mm ²		Bemerkungen
Gr.	Nr.	Breite b mm	Nahtdicke a mm Naht l Naht r		Bruchlast max P kN	Neigung d. Bruchfläche Altgrad Naht l Naht r		mittl. Breite a* d. Bruchfläche mm Naht l Naht r			Naht- wurzel	Poren	Binde- fehler	Einzelw.	Mittelw.	Einzelw.	Mittelw.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
AA 2	1	51,1	5,8	6,2	104,0	50	70	4,8	5,2	1,0	-			170	176	204	213	
	2	49,5	5,6	6,8	103,7	80	60	5,1	5,2	1,1	-		b	168		204		
	3	50,8	5,6	6,6	105,6	70	60	4,7	4,7	1,4	-			172		222		
	4	46,9	5,9	6,5	96,5	90	45	5,0	5,0	1,2	-		b	166		206		
	4	46,9	6,2	5,3	101,7	50	60	5,0	4,5	1,0	-			189		228		
	8	50,0	6,0	5,0	103,3	60	45	4,9	4,8	0,6	-			188		213		
	8	50,0	5,4	6,3	105,8	50	65	5,0	5,0	0,9	-			181		212		
BB 2	1	51,2	6,2	5,9	72,2	50	90	4,9	(3,8)	1,3	-		B	<118>	138	<163>	182	nicht wertbar
	2	51,6	6,1	5,8	84,6	50	80	4,8	4,7	1,2	-		b	139		176		
	3	49,5	6,1	5,1	90,0	50	60	5,0	5,1	0,6	-		b	163		181		
	4	45,7	4,5 A	4,3 A	41,0	90	60	(6,0)	2,0	-	-		B	<102>		<140>		Bruch in WEZ, Blech I
	4	45,7	6,5	6,3	87,0	-	-	-	-	-	-			<149>		-		Blechbruch 241 N/mm ²
	5	50,8	4,5 A	4,5 A	59,9	60	60	3,5	3,0	1,3	-		B	132		181		
	6	50,6	4,4 A	4,5 A	56,5	60	60	3,2	3,2	1,2	-		B	126		175		
	7	49,9	4,4 A	4,7 A	62,2	60	70	3,0	3,5	1,3	-		B	137		192		
8	50,7	4,5 A	4,6 A	60,8	60	90	3,0	6,0	1,5	-		B	132		(187)		Bruch in WEZ, :	
FF 2	1	50,5	6,7	5,8	91,6	50	80	5,7	(3,7)	1,5	-		B	145	160	195	204	Blech I (2 x 3,2 mm)
	2	51,5	7,0	5,8	95,5	-	-	-	-	-	-			<145>		-		Blechbruch 238 N/mm ²
	3	51,2	5,2	4,2	77,6	60	80	3,7	3,4	1,2	-		B	161		214		
	4	46,4	4,5 A	4,5 A	64,0	60	60	3,5	3,0	1,3	-		B	154		212		
	4	46,4	6,3	6,1	84,0	-	-	-	-	-	-			<146>		-		Blechbruch 232 N/mm ²
	5	50,5	4,5 A	4,4 A	74,2	60	60	3,8	3,2	0,9	-		b	165		210		
	6	51,5	4,5 A	4,4 A	74,5	80	60	3,8	3,5	0,8	-		p	164		198		
	7	50,8	4,6 A	4,5 A	78,4	70	60	4,0	3,8	0,7	-		p	170		198		
8	50,4	4,5 A	4,5 A	72,0	50	70	3,0	4,0	1,0	-		p	159		204			
AB 2	1	51,0	6,1	5,5	96,9	60	80	4,9	4,4	1,2	-		b	163	168	207	204	
	2	49,3	6,3	6,0	101,0	80	60	4,9	5,3	1,1	-		b	167		189		
	3	51,2	6,1	6,2	105,0	90	70	4,8	5,1	1,2	-		b	167		207		
	4	46,2	6,5	6,5	89,0	0	80	5,0	4,8	1,7	-		b	<148>		<197>		Bruch in WEZ,
	4	46,2	6,5	6,0	104,2	70	60	5,5	5,5	0,7	-		b	180		205		Blech II (teils)
	8	51,1	6,3	5,6	95,4	50	70	4,9	4,4	1,3	-			157		201		
	8	51,1	5,7	6,1	104,8	55	65	4,8	4,8	1,1	-			174		214		
AF 2	1	49,7	5,9	5,7	103,4	-	-	-	-	-	-			<179>	177	-		Querblech abgesichert
	2	50,8	5,1 A	4,5 A	90,9	60	85	4,0	4,0	0,8	-			186		224	214	
	3	50,1	4,5 A	4,3 A	77,7	80	70	4,0	3,6	0,5	-			180		205		
	4	45,7	6,0	6,2	94,8	60	60	4,5	5,0	1,3	-			170		218		
	4	45,7	6,5	6,4	106,6	-	-	-	-	-	-			<181>		-		Querblech abgesichert
	8	50,2	6,3	5,6	96,5	70	45	4,7	4,6	1,3	-			162		207		
	8	50,2	5,7	6,1	110,6	60	0	5,1	6,8	0,6	-			187		(216)		Bezug 2 x 5,1 mm

Tabelle 11: ZUSAMMENSTELLUNG DER ERGEBNISSE FÜR STIRNKEHLNAHTVERBINDUNGEN - DOPPELNAHT (Bild 3)
ZUSATZWERKSTOFF2 : S-AIMg5 (5356)

A = Naht abgearbeitet auf Sollmaß 4,5 mm

Proben- bez. Gr.	Nr.	Probenabmessung			Ergebnis des Zugversuches						Beurteilung der Bruch- fläche				rechn. Nahtbean- spruchung b. Bruch max P / $\Sigma a \cdot l$ N/mm ²		rechn. Nahtbean- spruchung b. Bruch max P / $\Sigma a \cdot l$ N/mm ²		Bemerkungen
		Breite b mm	Nahtdicke a mm	Naht	Bruchlast max P kN	Neigung d. Bruchfläche Altgrad		mittl. Breite a* d. Bruchfläche		$\Delta a - a^*$ mm	Naht- wurzel	Poren	Binder- fehler	Einzelw.	Mittelw.	Einzelw.	Mittelw.		
1	?	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
AA 3	1	50,8	6,0	5,9	98,5	45	80	4,9	4,6	1,2	-	p	B	163	186	205	216		
	2	50,1	6,4	5,2	101,5	45	70	5,2	4,6	0,9	-			175		208			
	3	50,4	6,1	5,6	112,3	50	75	5,1	4,8	0,9	-			192		225			
	4	46,0	6,1	5,9	104,2	70	60	6,0	5,5	0,3	-			189		197			
	4	46,0	5,8	6,0	111,0	60	60	5,0	5,2	0,8				205		237			
	8	49,0	6,2	5,5	105,2	45	70	5,0	5,0	0,9				184		215			
	8	49,0	6,4	6,2	120,0	70	70	5,5	5,5	0,8				194		223			
	BB 3	1	50,1	5,8	6,2	91,1	-	-	-	-	-				<152>	164	-	205	Bruch in Blech I 230 N/mm ²
2		51,5	4,6 A	4,5 A	76,7	80	85	3,7	4,1	0,7	-		b	164		191			
3		51,0	4,6 A	4,5 A	75,4	70	80	3,7	3,9	0,8	-		b	162		196			
4		46,2	4,4 A	4,5 A	56,8	80	60	3,2	3,8	0,9	-		b	<139>		<176>			
4		46,2	7,0	5,5	87,8	-	-	-	-	-				<152>		-		Blechbruch 241 N/mm ²	
5		50,1	4,5 A	4,6 A	75,1	60	60	3,5	3,8	0,9				166		205			
6		51,1	4,5 A	4,6 A	76,6	60	60	3,5	3,5	1,0				166		214			
7		48,8	4,5 A	4,6 A	71,9	60	60	3,2	3,8	1,1	-			162		211			
8	51,9	4,5 A	4,6 A	77,2	60	60	3,5	3,5	1,0	-			164		213				
FF 3	1	51,5	6,1	5,4	93,8	60	80	5,0	4,5	1,0	-		B	159	169	193	206		
	2	49,6	5,9	5,4	90,0	-	-	-	-	-				<160>		-		Blechbruch 233 N/mm ²	
	3	52,2	5,3 A	4,9 A	81,2	60	80	4,1	3,7	1,2	-		b	160		201			
	4	46,0	4,5 A	4,5 A	70,0	60	60	3,5	3,8	0,9	-		p	169		209			
	4	46,0	6,5	6,4	84,0	-	-	-	-	-				<142>		-		Blechbruch 234 N/mm ²	
	5	50,0	4,6 A	4,5 A	81,3	60	60	4,0	3,5	0,8				177		215			
	6	50,3	4,7 A	4,5 A	81,1	70	60	4,0	3,8	0,7				175		207			
	7	51,2	4,6 A	5,2 A	84,6	60	60	3,8	4,5	0,8	-		p	169		199			
8	50,2	4,7 A	4,9 A	83,3	60	70	3,5	4,2	0,9				174		216				
AB 3	1	51,2	5,9	6,2	108,7	70	70	4,7	4,3	1,6	-		B	175	174	237	229		
	2	49,9	6,1	6,0	102,2	-	-	-	-	-				<170>		-		Querblech abgesichert	
	3	50,7	4,6 A	4,6 A	79,6	85	70	3,3	3,5	1,4	-			171		231			
	4	45,6	5,8	5,8	77,6	0	60	6,0	4,5	1,3				<147>		<189>		Bruch in WEZ Blech II	
	4	45,6	5,9	5,8	99,6	0	60	7,0	4,0	1,8			B	187		(243)		" Bezug 2 x 4,5 mm	
	8	50,1	6,2	5,3	92,1	0	55	8,0	3,8	1,5				160		(204)		"	
	8	50,1	5,6	6,0	104,2	0	0	7,2	7,2	-				179		(231)		"	
	AF 3	1	51,0	6,1	5,8	107,0	-	-	-	-	-				<177>	191	-	245	Querblech abgesichert
2		51,3	4,8 A	4,6 A	87,9	70	80	3,5	3,8	1,1	-			184		237			
3		50,3	4,6 A	4,5 A	43,6	80	60	(1,9)	3,8	0,7	-			<96>		-		Starke Unregelmäßigkeit a	
4		45,0	5,3	5,6	96,0	50	45	3,5	4,5	1,5	-		b	196		267			
4		45,0	6,5	6,0	104,2	-	-	-	-	-				<185>		-		Querblech abgesichert	
8		50,8	5,4	6,0	110,9	45	70	4,7	4,8	1,0				192		230			
8		50,8	6,4	6,2	123,0	-	-	-	-	-				<192>		-		Querblech abgesichert	

A = Naht abgearbeitet auf Sollmaß 4,5 mm

Tabelle 12: ZUSAMMENSTELLUNG DER ERGEBNISSE FÜR STIRNKEHLNAHTVERBINDUNGEN - DOPPELNAHT (Bild 3)
ZUSATZWERKSTOFF 3 : S-ALMg4,5Mn (5183)

Proben- bez.		Probenabmessung			Ergebnis des Zugversuches					Δa $a - a^*$ mm	Beurteilung der Bruch- fläche			rechn. Nahtbean- spruchung b. Bruch max $P / \Sigma a \cdot t$ N/mm ²		rechn. Nahtbean- spruchung b. Bruch max $P / \Sigma a^* \cdot t$ N/mm ²		Bemerkungen
Gr.	Nr.	Breite b mm	Nahtdicke a mm Naht l Naht r		Bruchlast max P kN	Neigung d. Bruchfläche Altgrad Naht l Naht r		mittl. Breite a [*] d. Bruchfläche mm Naht l Naht r			Naht- wurzel	Poren	Binde- fehler	Einzelw.	Mittelw.	Einzelw.	Mittelw.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
BB 4	1	51,0	5,0	5,5	81,0	60	50	4,7	5,9	0	+	p		152	148	150	151	
	2	53,0	5,1	5,7	78,9	50	60	4,9	5,6	0,2	+	p		139		140		
	3	51,5	5,1	5,9	80,9	70	55	5,0	5,8	0,1	+	p		142		147		
	4	43,8	5,7	5,7	62,8	80	60	5,5	6,0	0	+	p		<126>		<125>		
	4	43,8	5,0	5,0	68,3	45	60	5,0	5,0	0	+			156		156		
	8	49,8	5,2	5,2	73,5	50	50	4,8	4,8	0,4				142		154		
	8	49,8	5,3	5,4	81,9	50	60	5,0	5,3	0,2	+			154		160		
AB 4	1	51,3	5,6	5,7	91,3	70	45	5,4	5,5	0,2				157	157	163	168	
	2	50,6	5,5	5,8	91,4	70	60	5,3	5,1	0,4				160		174		
	3	50,8	5,6	5,8	92,6	60	45	5,3	5,1	0,5				160		174		
	4	45,2	5,8	6,0	56,2	40	70	5,2	5,8	0,4				<105>		<113>		
	4	45,2	5,6	5,7	85,2	50	60	5,0	5,5	0,4				167		180		
	8	50,0	5,6	5,7	83,3	50	60	5,1	5,2	0,5				147		162		
	8	50,0	5,5	5,9	84,6	50	50	5,4	5,4	0,3	+			148		157		

Tabelle 13: ZUSAMMENSTELLUNG DER ERGEBNISSE FÜR STIRNKEHLNAHTVERBINDUNGEN - DOPPELNAHT (Bild 3)
ZUSATZWERKSTOFF 4 : S-AISI5 (4043)

Probenbezeichnung Gruppe	Nr.	Ergebnis des Zugversuches					Beurteilung der Bruchfläche			rechn. Nahtbeanspruchung beim Bruch		Vergleichswert τ_m N/mm ² Mittelwert	Bemerkungen
		Bruchlast max P kN	Neigungswinkel der Bruchfläche Altgrad Naht l Naht r		mittl. Breite a* der Bruchfläche mm Naht l Naht r		Nahtwurzel	Poren	Bindefehler	$\tau = \frac{\max P}{\sum \alpha \cdot l}$ Einzelwert	Mittelwert		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 ²⁾	14
BB 1	1	60,2	0	0	8,0	10,0				(56)	(52)	(82)	Bruch WEZ, Risse in Blechebene, ϑ : Bezug $\alpha_F^* = 4,6$ mm (Tab. 15)
	2	55,2	0	0	9,0	10,0				(48)	>100 ³⁾		
	3	50,1	0	0	9,0	8,0				(49)			
	4	56,7	0	0	8,9	8,1				(56)			
FF 1	1	76,6	50	45	5,3	5,0	++			124	127	109	
	2	71,4	45	45	5,1	5,2	++			116			
	3	71,9	45	45	4,6	4,5	++			132			
	4	75,3	45	45	4,4	5,0	++			134			
AF 1	1	77,5	45	45	4,3	4,2	++			152	149	121	
	2	83,2	40	50	4,3	5,0	++			149			
	3	82,6	45	55	4,3	4,5	++			157			
	4	84,1	30	45	4,9	5,2	+			139			
AA 2	1	76,3	45	45	4,0	4,5				150	164	112	
	2	79,0	50	45	4,0	4,3			b	159			
	3	74,4	45	45	3,2	3,7			b	180			
	4	75,3	45	40	4,1	3,4			b	167			
BB 2	1	70,1	45	45	3,8	4,3				144	142	105	
	2	67,6	45	45	4,0	4,2	-			137			
	3	71,8	45	45	4,2	4,0				146			
	4	74,6	45	45	4,3	4,6				140			
FF 2	1	75,9	45	45	4,3	4,2				149	150	110	
	2	73,8	45	45	4,2	4,5				141			
	3	72,9	45	45	3,8	4,0	--		b	156			
	4	75,2	45	45	4,0	4,2				153			
AB 2	1	69,7	45	45	3,5	3,7				161	153	104	
	2	68,8	50	50	3,8	3,7				153			
	3	69,0	45	45	3,7	3,9				151			
	4	74,7	45	45	4,2	4,2				148			
AF 2	1	78,7	45	45	3,9	3,7				173	164	117	
	2	80,4	50	50	4,3	4,2				158			
	3	80,6	45	60	3,6	4,0	-		b	177			
	4	76,7	45	45	4,4	4,3				147			
AA 3	1	93,0	45	45	4,8	5,0				158	167	140	
	2	97,8	45	40	5,3	5,0	+			158			
	3	91,9	45	35	4,0	4,7	+			176			
	4	98,3	45	45	4,8	4,6	+		b	174			
BB 3	1	74,4	0	0	9,5	8,1				(70)	(72)	(98)	Bruch WEZ wie BB 1 a): Bezug $\alpha_F^* = 4,8$ mm (Tab. 15)
	2	64,2	0	0	8,3	6,5				(72)	>115 ³⁾		
	3	67,3	0	0	7,5	8,3				(71)			
	4	59,8	0	0/45	8,1	5,6			b	(73)			
FF 3	1	87,0	45	45	5,0	4,5	+			153	144	123	
	2	80,0	50	50	4,5	4,9				142			
	3	83,0	45	45	4,8	5,0	-		b	142			
	4	83,3	45	45	4,9	5,2				138			
AB 3	1	73,0	30	0	4,0	6,2	--		B	(119)	164 ³⁾	119	³⁾ nur Versuche 2/4 gewertet Versuche 1/3 vgl. BB 1
	2	78,2	45	45	3,8	4,0	-		B	167			
	3	79,0	45	0/45	4,0	5,3	-		b	(142)			
	4	92,8	45	45	4,7	5,0	+			160			
AF 3	1	84,8	30	45/60	4,2	4,6	-		b	161	155	125	
	2	76,0	45	45	4,0	4,1	-		b	156			
	3	86,1	0/45	45	4,5	4,8	-		B	154			
	4	91,5	45	45	5,6	4,7	-		B	148			
BB 4	1	59,9	45	45	4,2	4,3				118	123	86	
	2	58,8	40	40	4,1	4,3				117			
	3	57,3	45	45	3,7	3,8				127			
	4	58,1	45	45	3,8	3,7				129			
AB 4	1	57,7	45	45	3,5	4,1	++			127	127	86	
	2	58,6	45	45	3,9	4,0	+			124			
	3	57,3	45	45	3,7	3,6	+			131			
	4	59,2	45	45	4,3	3,6				125			

²⁾ Ermittlung τ_m (Sp. 13): $\tau_m = \frac{\sum \max P}{4 \cdot 2 \cdot a \cdot l}$ wobei $l = 60$ mm $a = \frac{l}{12} = \frac{60}{12} = 5,66$ mm

Tabelle 14: ZUSAMMENSTELLUNG DER ERGEBNISSE FÜR FLANKENKEHLNAHTVERBINDUNGEN (Bild 4)

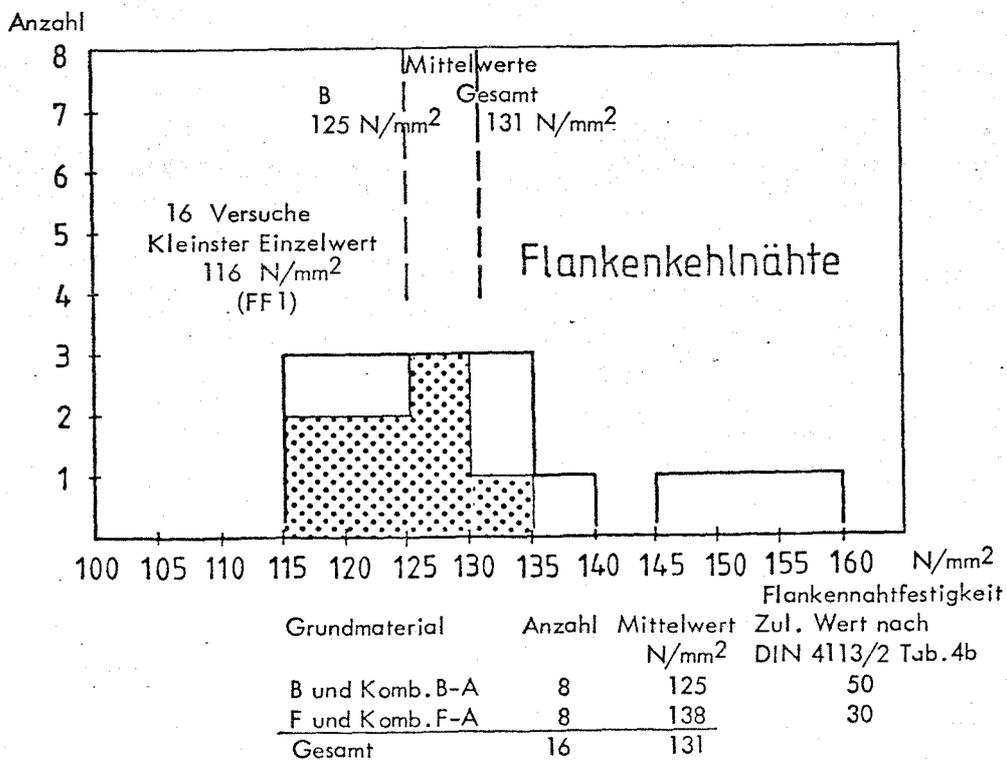
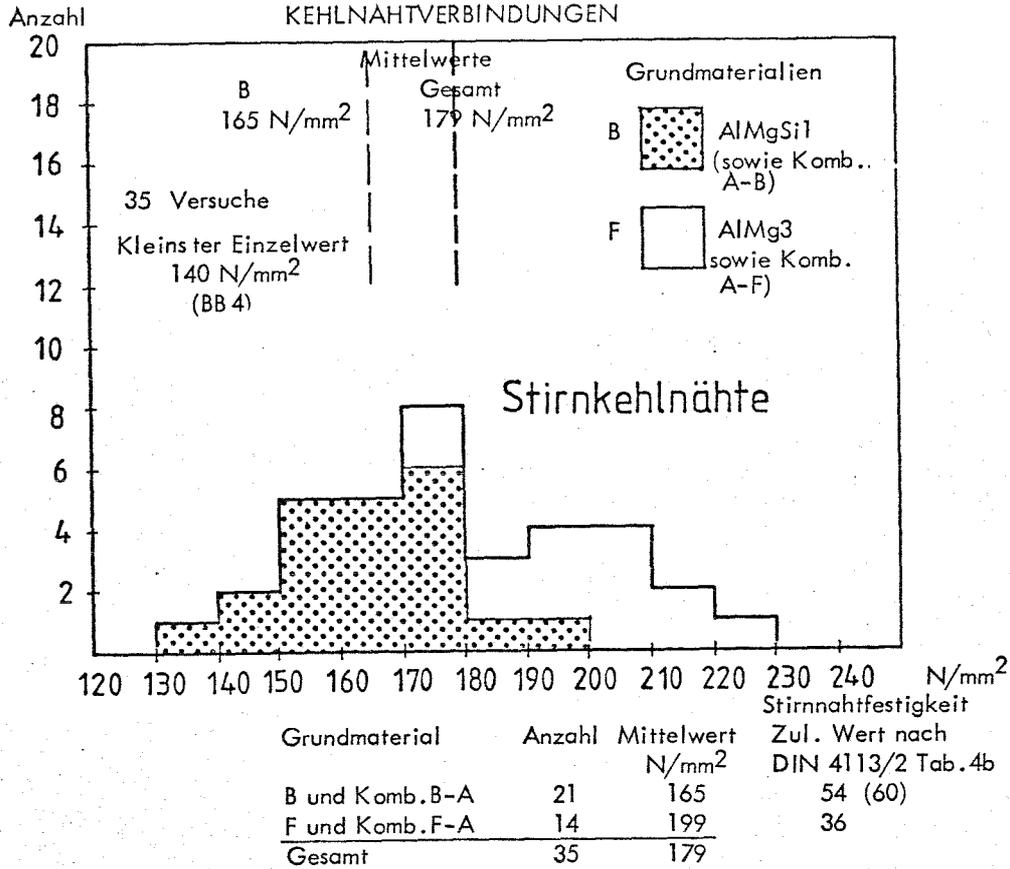
Gruppenbezeichnung	Stirnkehlnahtverb. gemessene mittl. Nahtdicke			Flankenkehlnaht gemessene mittl. Nahtdicke		Verhältniswert a_{St}^*/a_F^*	Bemerkungen
	a_{St} mm	a_{St}^* mm	Δa_{St} mm	$(a_F) \cdot \frac{t}{\sqrt{2}}$ mm	a_F^* mm		
1	2	3	4	5	6	7	8
BB 1	5,7 (4,5)	4,6 (3,5)	1,1	Keine Messung des Nahtmaßes a_F möglich. Rechnerischer Grenzwert: $a_F < t/\sqrt{2} \approx 5,7$ mm	(~4,6)	(1,0)	a_F^* rechnerisch entspr. FF 1, AF 1
FF 1	5,9 (4,5)	4,7 (3,5)	1,1		4,9	1,0	
AF 1	5,8 (4,4)	4,7 (3,2)	1,1		4,6	1,0	
AA 2	5,9	4,9	1,0	Keine Messung des Nahtmaßes a_F möglich. Rechnerischer Grenzwert: $a_F < t/\sqrt{2} \approx 5,7$ mm	3,9	1,3	Unterschiedliche Drahtdurchmesser: Stirnkehlnähte \varnothing 1,6 mm Flankenkehlnähte \varnothing 1,2 mm
BB 2	6,2 (4,5)	4,9 (3,2)	1,3		4,2	1,2	
FF 2	6,3 (4,5)	5,0 (3,5)	1,2		4,2	1,2	
AB 2	6,1	4,9	1,2		3,7	1,3	
AF 2	6,1 (4,6)	4,8 (3,9)	1,1		4,0	1,2	
AA 3	6,0	5,1	0,9	Keine Messung des Nahtmaßes a_F möglich. Rechnerischer Grenzwert: $a_F < t/\sqrt{2} \approx 5,7$ mm	4,8	1,1	a_F^* rechnerisch entspr. den übrigen Werten
BB 3	6,1 (4,5)	5,0 (3,6)	1,0		(~4,8)	(1,0)	
FF 3	6,1 (4,7)	5,0 (3,9)	1,0		4,9	1,0	
AB 3	6,0 (4,6)	4,3 (3,4)	1,5		4,2	1,0	
AF 3	6,0 (4,6)	4,4 (3,7)	1,3		4,6	1,0	
BB 4	5,3	5,2	0,1	Keine Messung des Nahtmaßes a_F möglich. Rechnerischer Grenzwert: $a_F < t/\sqrt{2} \approx 5,7$ mm	4,0	1,3	Unterschiedliche Draht \varnothing Stirnkehlnähte \varnothing 1,6 mm Flankenkehlnähte \varnothing 1,2 mm
AB 4	5,8	5,3	0,5		3,8	1,4	

Tabelle 15: ZUSAMMENSTELLUNG DER GEMESSENEN KEHLNAHTDICKEN (a_S , a_F : Außenmessung, a_S^* , a_F^* : Bruchfläche für Stirn- und Flankenkehlnähte)

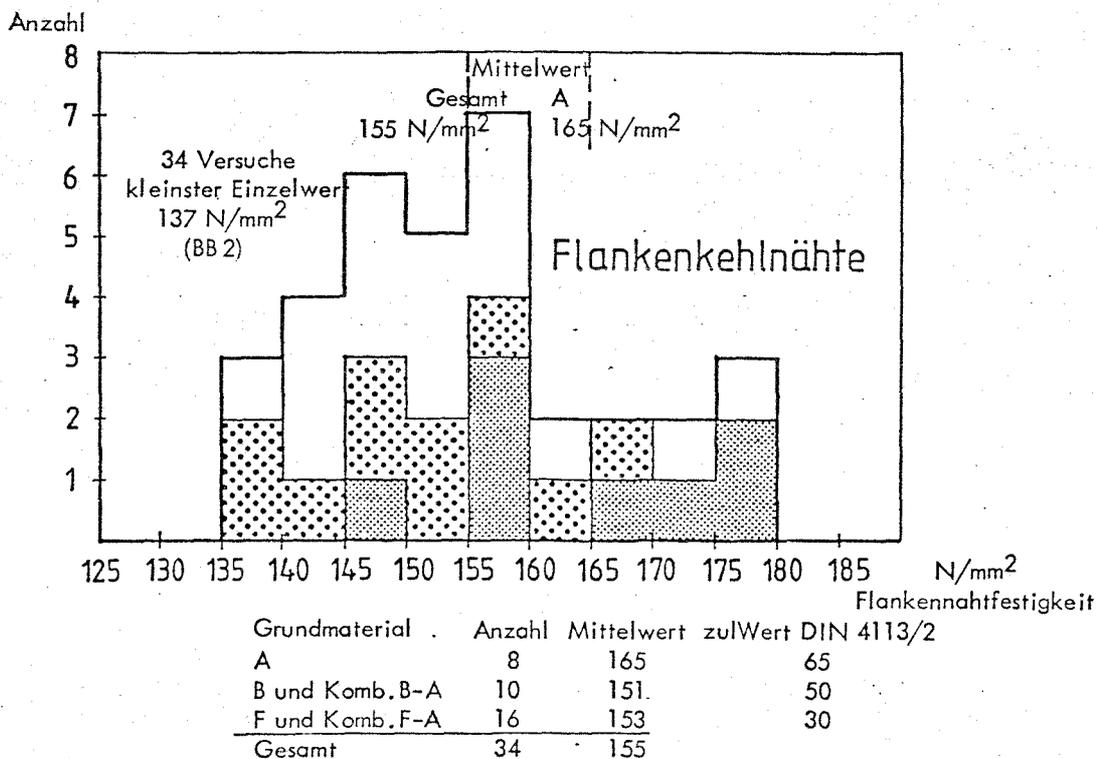
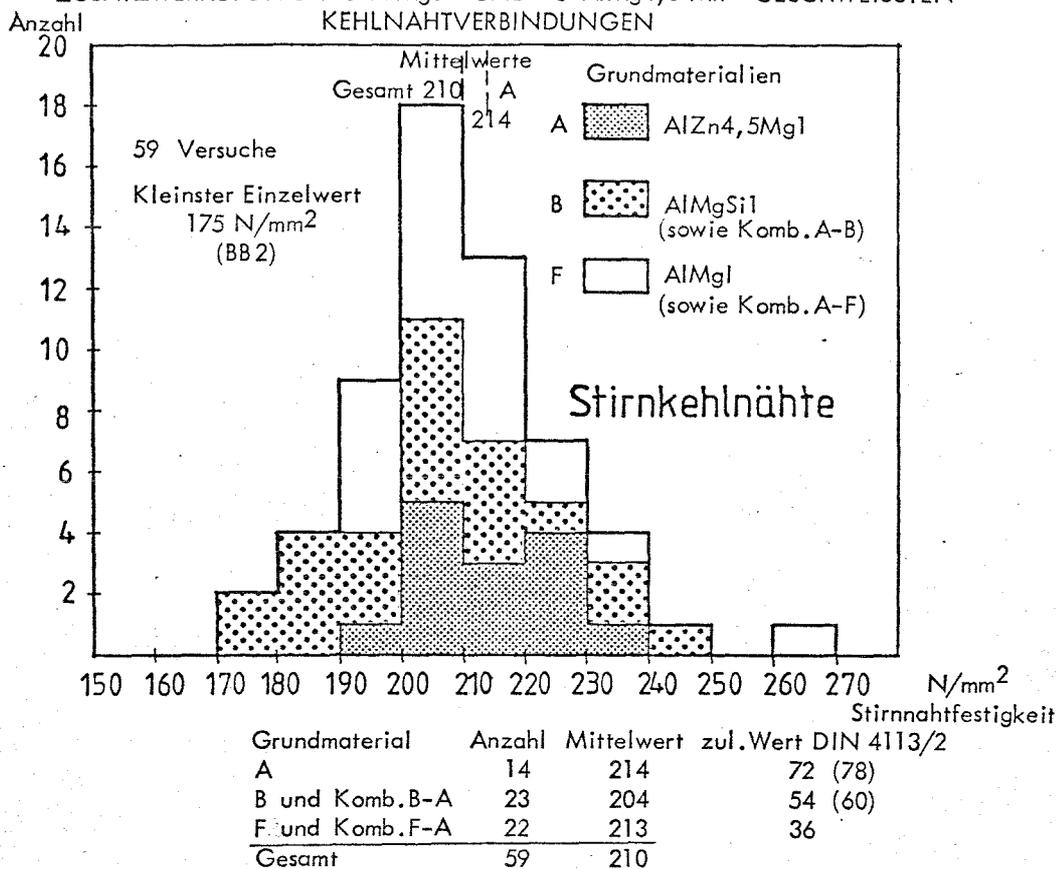
Gruppenbezeichnung	rechn. Kehlnahtbeanspruchung beim Bruch (Mittlere Werte in N/mm ²)						Verhältniswerte			Bemerkungen (Unterschiedliche Schweißbedingungen von Tab. 15)
	Stirnkehlnahtverbindung		Flankenkehlnaht		Sp. 3 5	Sp. 3 7	Sp. 5 7			
	Einzelstirnnaht Tabelle 9 Sp. 16	Doppelstirnnaht Tabellen 10-13 Sp. 18	Tabelle 14 Sp. 13 Sp. 12							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
BB 1	77	110	137	173	82	(>100)	0,64	(<1,10)	(<1,73)	Stirnnähte : S-ALMg 3 MIG Flankennähte : S-ALMg 3,5 MIG p.a.
FF 1	83	114	150	191	109	127	0,60	0,90	1,50	
AF 1	117	157	166	207	121	149	0,76	1,05	1,39	
AA 2	98	115	176	213	112	164	0,54	0,70	1,30	Stirnnähte : All State Ø 1,6, 225A, 26V Flankennähte : Alcoa Ø 1,2 180 A, 25V (AA 2 : 32 V)
BB 2	>68	122	138	182	105	142	0,67	0,86	1,28	
FF 2	84	115	160	204	110	150	0,56	0,77	1,36	
AB 2	>90	133	168	204	104	153	0,65	0,87	1,33	
AF 2	>113	>152	177	214	117	164	0,71	0,93	1,30	
AA 3	92	120	186	216	140	167	0,56	0,72	1,29	Stirnnähte : MIG, 225A, 26V Flankennähte : MIG p.a. 195A, 23V
BB 3	>93	>119	164	205	98	(>115)	0,58	(<1,03)	(<1,78)	
FF 3	87	111	169	206	123	144	0,54	0,77	1,43	
AB 3	85	126	174	229	119	164	0,55	0,77	1,40	
AF 3	114	163	191	245	125	155	0,67	1,05	1,58	
BB 4	80	80	148	151	86	123	0,53	0,65	1,23	Stirnnähte : Ø 1,6, 235A, 26V Flankennähte : Ø 1,2 180A, 25V
AB 4	61	70	157	168	86	127	0,42	0,55	1,32	

Tabelle 16: GEGENÜBERSTELLUNG DER ERGEBNISSE FÜR KEHLNAHTVERBINDUNGEN
(Auswertung der Tabellen 9 bis 14)

Bilder 5, 6: HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER BRUCHFESTIGKEIT VON N MIT DEN ZUSATZWERKSTOFFEN S-ALMg3 UND S-AISI5 GESCHWEISSTEN KEHLNAHTVERBINDUNGEN



Bilder 7, 8: HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER BRUCHFESTIGKEIT VON MIT DEN ZUSATZWERKSTOFFEN S-ALMg5 UND S-ALMg4,5 Mn GESCHWEISSTEN KEHLNAHTVERBINDUNGEN



N/mm^2 $R_{p0,2}$ und R_m
300

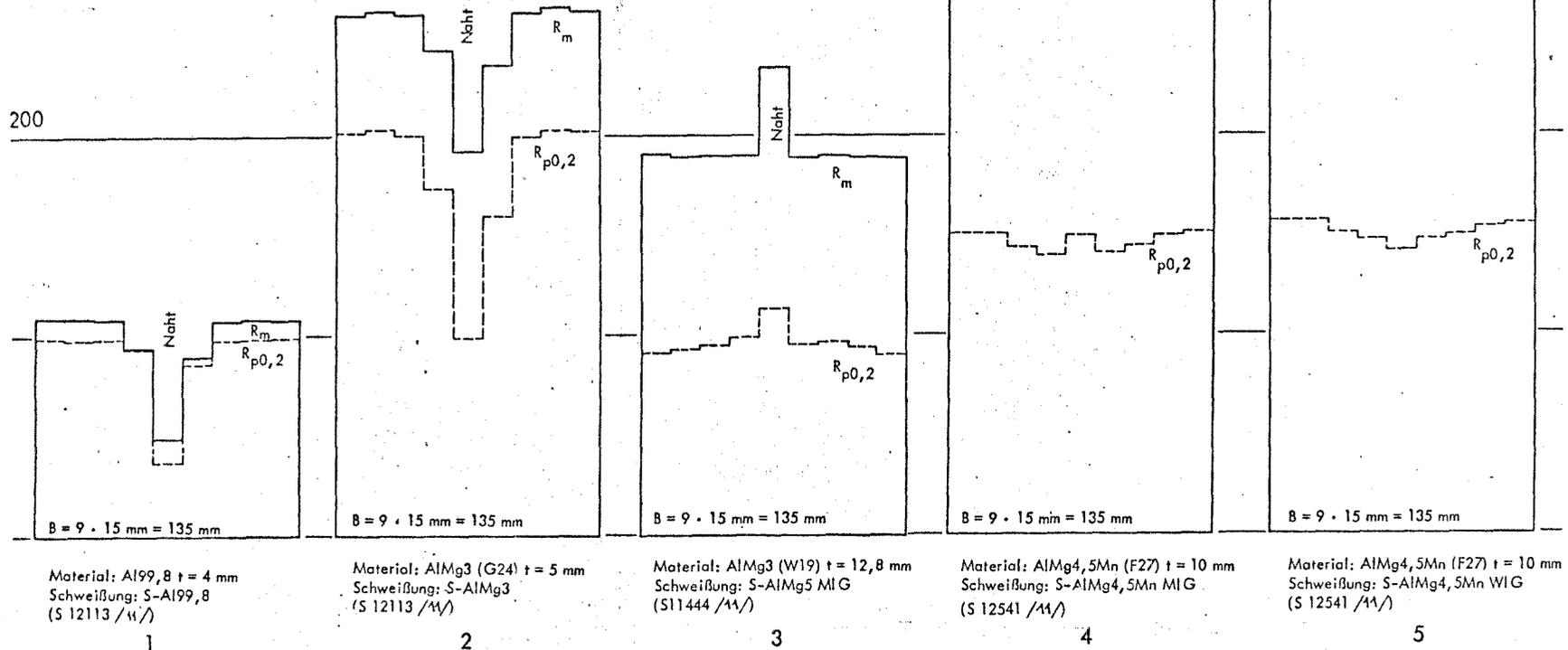
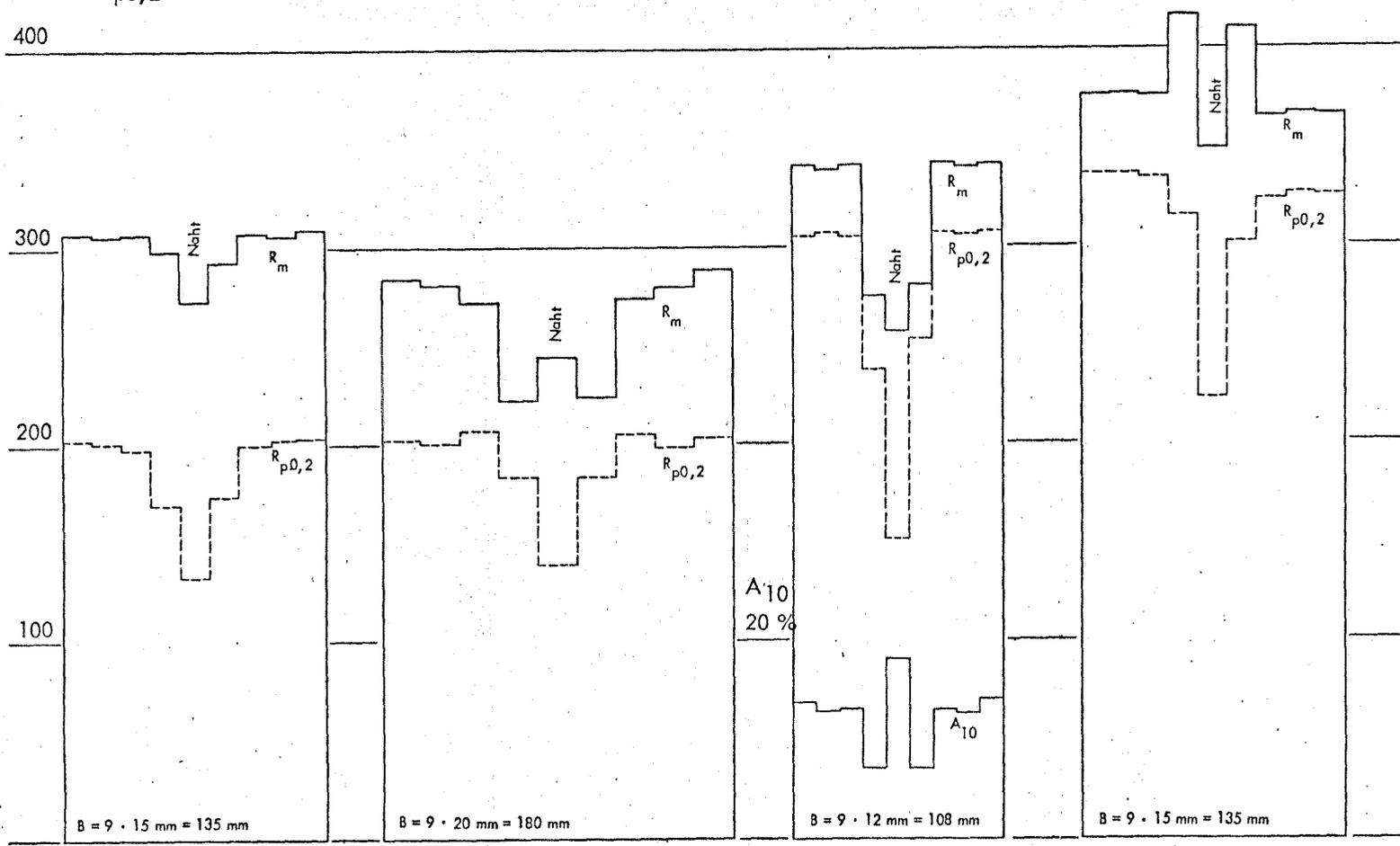


Bild 9: KENNWERTPROFILE VON SCHWEISSNAHTBEREICHEN MIT UNTERSCHIEDLICHEN GRUND-ZUSATZWERKSTOFF-KOMBINATIONEN (Vorversuche zu Programmteil GZ und W)

N/mm² R_{p0,2} und R_m

400



Material: AlMg5 (F27) t = 10 mm
Schweißung: S-AlMg5 MIG
(S 11444 /tt/)

Material: AlMgSi1 (F28) t = 6 mm
Schweißung: S-AlMg5
(S 12597 /tt/)

Material: AlMgSi1 (F32) t = 4 mm
Schweißung: S-AlSi5 MIG p.g.
(Versuchsteil W /15/)

Material: AlZn4,5Mg1 (F35) t = 10 mm
Schweißung: S-AlMg5 MIG
(S 11444 /tt/)

6

7

8

9

Bild 10: KENNWERTPROFILE VON SCHWEISSNAHTBEREICHEN MIT UNTERSCHIEDLICHEN GRUND-ZUSATZWERK-STOFF-KENNWERTEN (Vorversuche zu Programmteil GZ und W)

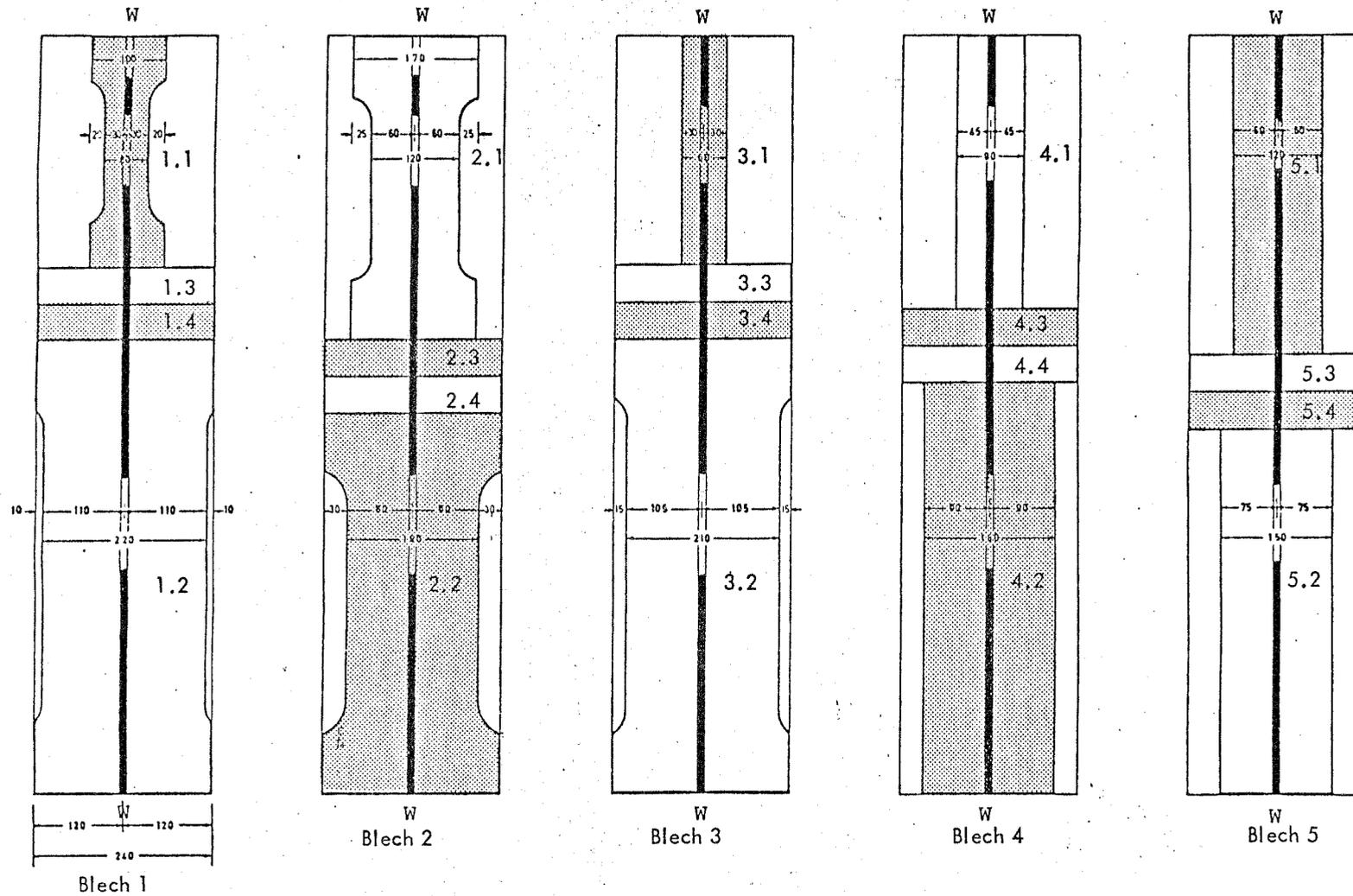


Bild 11: AUFTEILUNG DER GESCHWEISSTEN BLECHE 1 BIS 5 IN EINZELPROBEN UND BEZEICHNUNG DER PRÜFSTÜCKE
 (Nahtwinkel $\alpha = 0^\circ$ u. Vergleichsproben $\alpha = 90^\circ$)

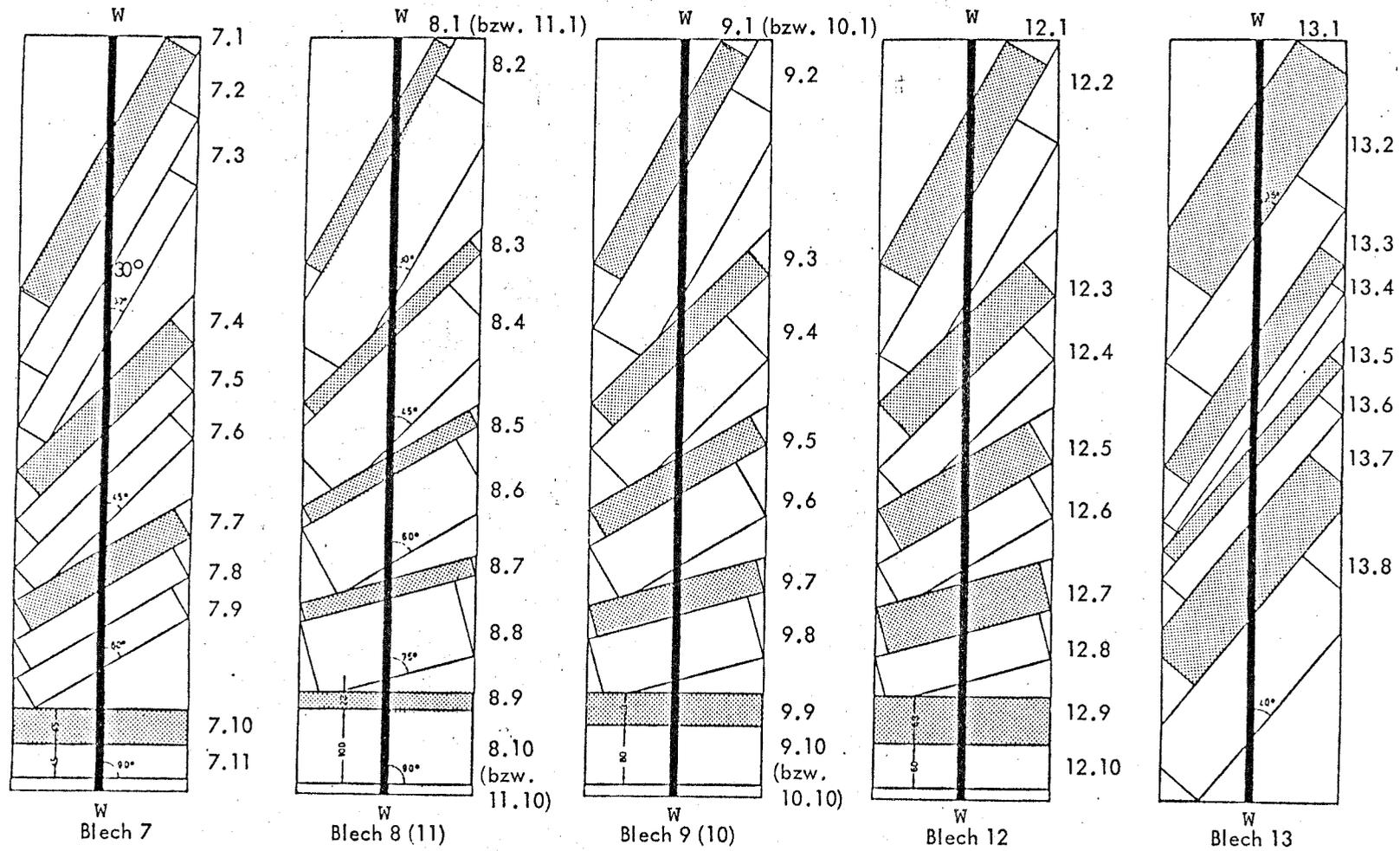
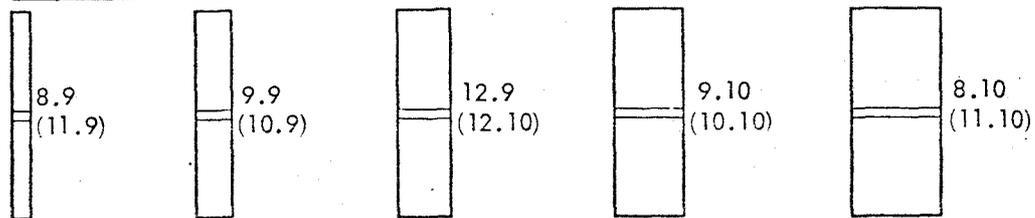
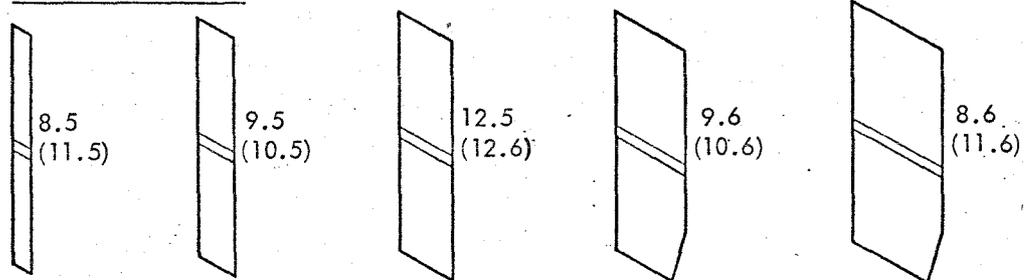


Bild 12: AUFTEILUNG DER GESCHWEISSTEN BLECHE 7 BIS 13 IN EINZELPROBEN UND BEZEICHNUNG DER PRÜFSTÜCKE (Nahtwinkel $\alpha = 30^\circ$ bis 90°)

Nahtwinkel $\alpha = 90^\circ$



Nahtwinkel $\alpha = 60^\circ$



Nahtwinkel $\alpha = 30^\circ$

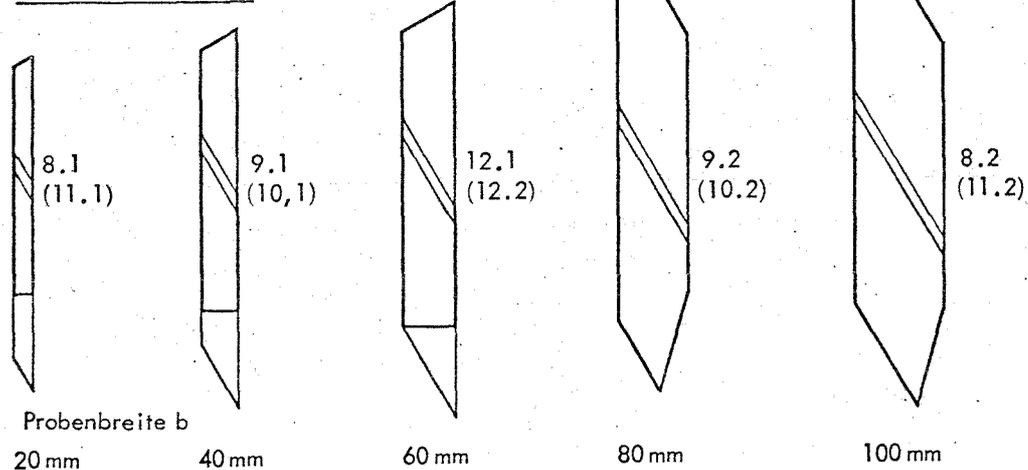


Bild 13: BEISPIELHAFTE DARSTELLUNG DER EINZELPROBEN
(Entnahme und Bezeichnung entsprechend Bild 11,12)

Angaben zum Versuchsstück			Berechnungsergebnis erwartete		Versuchsergebnisse				Bemerkungen
Nahtwinkel Altgrad	Probenbreite mm	Probenbezeichnung	Bruchlage	Bruchkraft F_R kN	Bruchlage	Bruchkraft F_V kN	Abweichung F_V/F_R %	Bezugswert $F_V/b \cdot t$ N/mm ²	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	60,0	1.1	1	72,15	1	73,40	+ 1,7	310,5	2.Versuch Probe 1.1 Nahtfehler 2.Versuch Probe 3.1
	60,1	1.1 (2)		72,28	1	74,70	+ 3,5	316,0	
		3.1 3.1 (2)			1	(66,0) 70,3	(-) - 2,7	- 296,9	
0	89,8	4.1	1	109,7	1	108,0	- 1,6	305,2	2.Versuch Probe 4.1
		4.1 (2)			1	110,5	+ 0,7	312,3	
0	120,0	2.1	1	147,8	1	153,2	+ 3,7	324,0	2.Versuch Probe 2.1 2.Versuch Probe 5.1
	119,9	2.1 (2)		147,7	1	151,5	+ 2,5	320,4	
		5.1 5.1 (2)			1	147,1 149,6	- 0,4 + 1,3	311,4 316,7	
0	150,0	5.2	1	185,6	1	186,8	+ 0,6	316,1	2.Versuch Probe 5.2
		5.2 (2)			1	187,2	+ 0,9	316,8	
0	178,4	2.2	1	221,4	1	228,3	+ 3,1	324,8	2.Versuch Probe 2.2 2.Versuch Probe 4.2
	180,4	2.2 (2)		224,0	1	222,5	+ 0,5	316,5	
		4.2 4.2 (2)			1	222,6 226,7	- 0,6 + 1,2	313,2 318,9	
0	210,0	3.2	1	261,3	1	258,5	- 1,1	312,4	
0	220,0	1.2	1	273,9	1	280,1	+ 2,3	323,1	
30	21,1	8.1	2	23,42	2	23,82	+ 1,7	286,5	Nahtfehler
	20,0	11.1		22,03	2	21,55	- 2,2	273,5	
30	38,7	7.1	1 - 2	44,75	1/2	44,50	- 0,6	291,8	
	30,6	7.2		44,63	1/2	45,31	+ 1,5	297,9	
	37,9	7.3		43,73	1/2	44,35	+ 1,4	297,0	
	38,6	9.1		44,63	1	45,60	+ 2,2	299,8	
30	38,7	10.1	1 - 2	44,75	2	44,70	- 0,1	293,2	
	59,2	12.1		70,60	1	(67,8)	(-)	(290,7)	
30	59,3	12.2	1 - 2	70,73	1	72,6	+ 2,7	310,7	
	77,5	9.2		93,67	1	95,6	+ 2,1	313,1	
30	78,8	10.2	1 - 2	95,31	1	95,4	+ 0,1	307,3	
	97,4	8.2		118,8	1	120,9	+ 1,8	315,0	
30	97,4	11.2	1 - 2	118,8	1	119,0	+ 0,2	310,1	

Tabelle 17: ERGEBNISSE DER VERSUCHE AN PROBEN $\alpha = 0^\circ$ BIS $\alpha = 30^\circ$
(Bild 11, 12, 13)

Angaben zum Versuchsstück			Berechnungsergebnis erwartete		Versuchsergebnisse				Bemerkungen
Naht- winkel Altgrad	Proben- breite mm	Proben- bezeich- nung	Bruch- lage	Bruch- kraft F _R kN	Bruch- lage	Bruch- kraft F _V kN	Abwei- chung F _V /F _R %	Bezugs- wert F _V /b·t N/mm ²	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
35	19,0	13.4	2	20,59	2/3	21,0	+ 2,0	280,5	Nahtfehler
35	38,3	13.3	1 - 2	44,02	2/3	44,6	+ 1,3	295,6	
35	72,7	13.2	1-2-3	87,39	2/3	87,6	+ 0,2	305,8	
35	96,0	13.1	1-2-3	116,3	1/3	114,0	- 2,0	301,4	
40	19,0	13.5	2	20,35	2/3	20,0	- 1,7	267,2	
40	36,9	13.6	3	41,24	2/3	40,4	- 2,0	277,9	
40	76,4	13.7	3	85,38	2/3	87,0	+ 1,9	289,0	
40	94,7	13.8	3	105,8	2/3	108,0	+ 2,1	289,5	
45	18,8 19,5	8.3 11.3	2 - 3	19,80 20,53	2/3 2/3	18,7 19,87	- 5,5 - 3,2	252,5 258,6	
45	39,5 38,6 38,7 38,7 39,0	7.4 7.5 7.6 9.3 10.3	3	41,59 40,65 40,75 40,75 41,07	2/3 2/3 2/3 3 2/3	40,6 39,7 39,5 39,9 40,8	- 2,4 - 2,3 - 3,1 - 2,1 - 0,6	260,9 261,0 259,1 261,7 265,5	
45	57,2 58,5	12.3 12.4	3	60,23 61,60	3 3	60,2 62,2	0 + 1,0	267,1 269,9	
45	77,2 79,1	9.4 10.4	3	81,29 83,29	3 2/3	80,4 82,3	- 1,1 - 1,2	264,3 264,1	
45	97,4 97,5	8.4 11.4	3	102,6 102,7	2/3 3	103,2 103,8	+ 0,6 + 1,1	268,9 270,2	
60	19,4 20,1	8.5 11.5	2 - 3	18,82 19,50	3 3	19,31 19,38	+ 2,6 - 0,6	252,6 244,7	
60	39,7 39,1 39,1 36,4 38,5	7.7 7.8 7.9 9.5 10.5	3	38,51 38,5 37,93 35,31 37,34	2/3 3 3 3 3	38,8 38,5 38,81 36,7 37,9	+ 0,8 + 1,5 + 2,3 + 4,0 + 1,5	248,1 249,9 251,9 255,9 249,9	
60	58,2 59,2	12.5 12.6	3	56,45 57,42	3 3	58,2 60,1	+ 3,1 + 4,7	253,8 257,7	
60	78,5 79,5	9.6 10.6	3	76,14 77,11	3 3	78,5 79,4	+ 3,1 + 3,0	253,8 253,5	
60	98,3 99,1	8.6 11.6	3	95,35 96,12	3 3	98,2 100,2	+ 3,0 + 4,2	253,5 256,6	

Tabelle 18 : ERGEBNISSE DER VERSUCHE AN PROBEN $\alpha = 35^\circ$ BIS $\alpha = 60^\circ$
(Bild 12, 13)

Angaben zum Versuchsstück			Berechnungsergebnis erwartete		Versuchsergebnisse				Bemerkungen		
Naht- winkel Altgrad	Proben- breite mm	Proben- bezeich- nung	Bruch- lage	Bruch- kraft F _R kN	Bruch- lage	Bruch- kraft F _V kN	Abwei- chung F _V /F _R %	Bezugs- wert F _V /b·t N/mm ²			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
75	19,9	8.7	2 - 3	19,34	3	19,35	0	246,8			
	20,4	11.7		19,83	3	19,71	- 0,6	245,2			
75	38,2	9.7	2 - 3	37,13	3	37,3	+ 0,5	247,8			
	38,5	10,7		37,42	3	38,1	+ 1,8	251,2			
75	60,0	12.7	3	58,32	3	60,4	+ 3,6	255,5			
	59,2	12.8		57,55		61,4	+ 6,7	263,2			
75	78,3	9.8	3	76,11	3	77,4	+ 1,7	250,9			
	80,0	10.8		77,77		3	78,6	+ 1,1		249,4	
75	97,9	8.8	3	95,17	3	97,2	+ 2,1	252,0			
	99,9	11.8		97,11		3	100,7	+ 3,7		255,8	
90	18,5	8.9	3	18,22	3	17,42	- 4,4	239,0			
	19,9	11.9		19,60		3	18,19	- 7,2		232,0	
90	37,8	9.9	3	37,23	N N/Ü	(32,10)	(-)	(215,5)		Nahtfehler Nahtfehler	
	38,2	10.9		37,63		37,2	- 1,1	247,2			
	42,2	7.10		41,52		3	41,1	- 1,0			247,5
	37,7	7.11		37,09		3	36,31	- 2,1			244,8
90	48,3	1.3	3	47,58	3	49,0	+ 3,0	257,5			
	49,3	1.4		48,56		3	49,4	+ 1,7		254,3	
	48,3	2.3		47,58		3	47,7	+ 0,3		250,7	
	49,3	2.4		48,56		3	49,2	+ 1,3		253,3	
	47,2	3.3		46,49		3	46,6	+ 0,2	250,6		
	48,0	3.4		47,28		3	47,8	+ 1,1	252,7		
	47,4	4.3		46,69		3	45,85	- 1,8	245,5		
	48,7	4.4		47,97		3	47,25	- 1,5	246,3		
	48,1	5.3		47,38		3	46,0	- 2,9	242,7		
	46,9	5.4		46,20		3	44,8	- 3,0	242,4		
	90	56,9		12.9		3	56,05	3 N/Ü	56,8	+ 1,3	253,4
57,2		12.10	56,34	58,4	+ 3,7		259,1				
90	74,4	9.10	3	73,28	3 N/Ü	72,2	- 1,5	246,3			
	74,5	10.10		73,38		72,4	- 1,3	246,7			
90	94,5	8.10	3	93,08	3	92,0	- 1,2	247,1			
	98,6	11.10		97,12		3	100,9	+ 3,9	259,7		

Tabelle 19 : ERGEBNISSE DER VERSUCHE AN PROBEN $\alpha = 75^\circ$ BIS $\alpha = 90^\circ$
(Bild 11, 12, 13)

Angaben zum Versuchsstück			Berechnungsergebnis erwartete		Versuchsergebnisse				Bemerkungen
Nahtwinkel Altgrad	Probenbreite mm	Probenbezeichnung	Bruchlage	Bruchkraft F_R kN	Bruchlage	Bruchkraft F_V kN	Abweichung F_V/F_R %	Bezugswert $F_V/b \cdot t$ N/mm ²	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
35	30,5	X-1.1	2	35,09	2/3	34,6	- 1,4	287,9	
	32,0	X-3.1	1 - 2	36,98	1/2	36,5	- 1,3	289,5	
	31,2	X-4.1	1 - 2	35,97	2/3	35,2	- 2,1	286,8	
35	47,2	XI-1.1	1	55,24	1/3	54,8	- 0,8	294,7	
	47,8	XI-1.2		55,99	1/3	55,7	- 0,5	295,8	
35	64,3	X-1.2	1-2-3	76,80	2/3	76,0	- 1,0	300,0	
	63,7	X-3.2		76,04	1/3	76,0	0	302,8	
	64,3	X-4.2		76,80	2/3	75,2	- 2,1	296,8	
	65,9	XII-4.1		78,82	2/3	78,8	0	303,5	
40	31,5	X-1.3	3	35,20	2/3	33,6	- 4,5	270,7	
	31,3	X-4.3		34,98	2/3	34,4	- 1,7	278,9	
	30,9	XII-4.2		34,53	2/3	33,0	- 4,4	271,1	
40	47,1	X-2.1	3	52,64	2/3	53,2	+ 1,1	286,7	
	49,2	X-2.2		54,94	2/3	55,6	+ 1,1	286,8	
40	66,0	X-1.4	3	73,76	2/3	74,8	+ 1,4	287,6	
	67,0	X-4.4		74,88	3	74,6	- 0,4	282,6	
	67,3	XII-4.3		75,21	3	73,8	- 1,9	278,3	

Tabelle 20: ERGEBNISSE DER ZUSATZVERSUCHE AN PROBEN $\alpha = 35^\circ \div 40^\circ$
(Proben aus vorbelasteten Blechabschnitten)