

# Schraubentragfähigkeit an Wellblechsilos

**T 1774**

T 1774

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen 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](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

16.40  
9.04.1986

I n s t i t u t f ü r S i l o t e c h n i k ,   B r a u n s c h w e i g

Schluss-Bericht

zum Forschungsvorhaben

**"Schraubentragfähigkeit an Wellblechsilos"**

Dr.-Ing. Peter Martens

und

Dr.-Ing. Karl Wolf

Dieses Forschungsvorhaben wurde finanziert vom Institut für Bautechnik in Berlin.

# Inhalt

	Seite
Vorwort	4
<b>1.0 Ziel der Untersuchungen</b>	<b>5</b>
<b>2.0 Derzeitige Bemessung von Schraubverbindungen</b>	<b>6</b>
<b>3.0 Eigene Untersuchungen</b>	<b>17</b>
3.1 Versuchsprogramm	17
3.2 Statistische Auswertung	22
<b>4.0 Werkstoffuntersuchungen</b>	<b>24</b>
4.1 Beschichtungs- und Überzugsdicke der Bleche	24
4.2 Blechdicke	38
4.3 Untersuchung an Materialproben	
Zugfestigkeit, Mindeststreckgrenze, Dehnung	45
4.4 Verhalten der Zugproben bei langsam aufgebrachter Last	55
<b>5.0 Zugversuche der Prüfkörper und deren Auswertung</b>	<b>57</b>
5.1 Versuchsdurchführung	57
5.2 Versuchsauswertung	60
5.3 Abminderungsfaktor $a_D$ bei Dauerlast	63
5.4 Lochleibungsspannungen bei Erreichen der Tragfähigkeit	71
5.4.1 Tragfähigkeit bei zügig aufgebrachttr Last	71
5.4.2 Tragfähigkeit bei langsam aufgebrachter Last	71
5.5 Auf St 37-2 bezogene Lochleibungsspannungen bei Erreichen der Tragfähigkeit	80
5.5.1 Tragfähigkeit bei zügig aufgebrachter Last	80
5.5.2 Tragfähigkeit bei langsam aufgebrachter Last	99
5.6 Auf St 37-2 bezogene Lochleibungsspannung bei einem Verschiebungsweg von 10 mm und langsam aufgebrachter Last	101
5.7 Auf St 37-2 bezogene Lochleibungsspannung bei einem Verschiebungsweg von 5 mm und langsam aufgebrachter Last	109
5.8 Gemessene Lochleibungsspannung für emaillierte Bleche	117
5.8.1 Lochleibungsspannungen bei der die Bleche zu klaffen beginnen	117
5.8.2 Lochleibungsspannungen bei der die Emaille abplatzt	118
5.9 Untersuchung der Verschiebungswege	128
5.9.1 Verschiebungsweg bei Erreichen der Traglast	128
5.9.2 Untersuchung der Verschiebungswege beim Auseinander- klaffen der emaillierten Bleche und beim Abplatzen der Emaille.	131
<b>6.0 Ergebnis der Untersuchungen</b>	<b>131</b>
<b>7.0 Zusammenfassung</b>	<b>139</b>
Literatur	142

## Vorwort

Der Absatz dünnwandiger Rundsilos hat sich - insbesondere auf dem landwirtschaftlichen Sektor - im vergangenen Jahrzehnt vervielfacht. Im Bereich unserer Bundesrepublik wurden im Jahre 1983 schätzungsweise 8000 Silos neu aufgestellt mit Durchmesser zwischen 2,50 m und 18,0 m. Es war deshalb naheliegend, die Konstruktionsregeln für derartige Silos in einer Norm zusammenzufassen.

Ein wesentlicher Gesichtspunkt sind im Hinblick auf die Standicherheit und auf die Wirtschaftlichkeit die für den Silobau erforderlichen Schraubverbindungen. Mit dem Forschungsvorhaben "Schraubentragfähigkeit an Wellblechsilos" wurden u.a. die Einflüsse der dünnen Bleche und der dünnen Schrauben mit insgesamt 540 Traglastversuchen ermittelt. Dieses Forschungsvorhaben wurde dankenswerterweise vom Institut für Bautechnik in Berlin finanziert.

Frau Dipl.-Ing. Klarhold vom Institut für Stahlbau führte die Traglastversuche gewissenhaft aus, während Herr Dr.-Ing. Wolf die umfangreiche Auswertung und Zusammenfassung übernommen hat. Beiden sei an dieser Stelle gedankt.

Peter Martens

## 1.0 Ziel der Untersuchungen

In der neuen Bemessungs- und Konstruktionsvorschrift des Stahlbaus DIN 18 800 Teil 1 werden für die Scher- und Lochleibungsverbindungen, sowie für die gleitfesten Verbindungen mit hochfesten Schrauben und für die nicht planmäßig vorgespannten Schrauben Rechenwerte auf der Grundlage zulässiger Spannungen angegeben. Erfasst sind die Lochleibungsspannungen zu  $\sigma_{\perp}$  der Werkstoffe St 37-2, St 37-3 und die des St 52-3 für Materialdicken  $t > 3$  mm, sowie die Scherspannungen zu  $\tau_a$  und die Zugspannungen zu  $\sigma_z$  für SL und SLP-Verbindungen der Schraubenspannungsklassen 4.6, 5.6 und 10.9. Die dort aufgeführten Schraubendurchmesser reichen von M 12 bis M 36 und decken die üblichen Konstruktionen des Stahlbaues ab.

Jedoch werden die dünnen Bleche, deren Dicke  $t < 3$  mm ist, oder Schraubverbindungen bei denen die Kraftübertragung mit Schrauben M 8 und M 10 erfolgt, von DIN 18 800 TEIL 1 (3.81) nicht erfaßt.

Besonders deutlich trat dieser Mangel während der Erarbeitung der DIN 18 914 DÜNNWANDIGE RUNDSTÄBE AUS STAHL zutage, in deren Anwendungsbereich ausschließlich Wandbleche mit den Dicke..  $0,75 \text{ mm} \leq t < 4 \text{ mm}$  fallen. Hier werden zusätzlich zu den in DIN 18 800 Teil 1 (3.81) aufgeführten Spannungsklassen häufig Schrauben der Güte 6.8 und 8.8 verwendet.

Auch ist es nicht immer ohne weiteres möglich, verzinkte, aluminierete, emaillierte und kunststoffbeschichtete Bleche dem Stahl St 37-2 oder St 52-3 zuzuordnen.

Dieses Forschungsvorhaben soll dazu beitragen, die Sicherheit in der Aussage über die Tragfähigkeit von Schraubverbindungen im Bruch- und im Gebrauchszustand für dünne Bleche zu vergrößern. Des weiteren wird versucht, eine Zuordnung der emaillierten, der verzinkten, der aluminiumüberzogenen und der kunststoffbeschichteten Bleche nach DIN 17 100 vorzunehmen, da diese Bleche bei der Konstruktion dünnwandiger Silos häufig verwendet werden.

Es werden die Maßhaltigkeit der Blechdicke und die des Überzuges, bzw. die der Beschichtungsdicke überprüft. Bei den emaillierten Blechen wird darüber hinaus untersucht, bei welcher Beanspruchung die Fuge zwischen den Blechen deutlich sichtbar auseinanderklafft und bei welcher Beanspruchung die Emaile abspaltert.

Der Einfluß der langsamen Lastaufbringung gegenüber der zügigen Lastaufbringung wird durch entsprechende Faktoren berücksichtigt.

## **2.0 Derzeitige Bemessung der Schraubverbindungen**

Schraubverbindungen werden dann eingesetzt, wenn Bauteile zu verbinden sind und insbesondere, wenn die Bauteile auf der Baustelle montiert werden.

Schrauben sind in der Lage, Kräfte rechtwinklig zur Schraubenachse (Scherverbindungen) und parallel zur Schraubenachse (Zugverbindungen) zu übertragen. Im Rahmen dieser Arbeit werden nur die Scherverbindungen behandelt. Hierfür regelt die DIN 18 800 TEIL 1 (3.81) die zulässigen Beanspruchungen und erfaßt die Versagenskriterien:

Abscherversagen

Lochleibungsversagen

Versagen im Nettoquerschnitt

Bei dünnwandigen Blechen wird durch das Lochleibungsversagen oder das Versagen des Nettoquerschnittes die Tragfähigkeitsgrenze der Schraubverbindung erreicht. Durch ausreichende Querschnittsabmessungen und ausreichende Randabstände konnte bei den hier durchgeführten Tragfähigkeitsversuchen das Versagen des Nettoquerschnittes ebenfalls ausgeschaltet werden, so daß im weiteren nur auf das Lochleibungsversagen und auf die damit verbundene Problematik bei dünnwandigen Blechen eingegangen zu werden braucht.

Schrauben übertragen die Kräfte punktförmig, wodurch eine hohe örtliche Beanspruchung im Bauteil und in der Schraube hervorgerufen wird. Durch Vorspannen der Schrauben in ihrer Längsachse und Bearbeitung der Kontaktfläche zwischen den zu verbindenden Bauteilen können die Übertragungsflächen vergrößert und somit günstigere Verhältnisse geschaffen werden. Dadurch wird eine größere Lastübertragung möglich, bzw. für den Gebrauchszustand sind geringere Verformungen zu erwarten.

Im Nachfolgenden sollen drei verschiedene Berechnungsmethoden gegenübergestellt werden: Nach DIN 18 800 Teil 1 /7/, nach Valinat /13/ und nach dem EUROCODE Nr. 3 /1/.

In DIN 18 800 Teil 1 Tabelle 7 wird in Abhängigkeit von der Wirkungsweise der rechtwinklig zur Schraubenachse beanspruchten Bauteile und im Hinblick auf die zulässigen Lochleibungsspannungen nach folgenden Typen der Anschlüsse unterschieden:

- a) SL-Verbindungen von Schrauben der Festigkeitsklassen 4.6 bis 10.9. Sie werden nicht vorgespannt, und das Lochspiel darf  $0,3 \text{ mm} < \Delta d < 2 \text{ mm}$  betragen.

- b) SL-Verbindungen von Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9. Die Schrauben werden mit  $F \geq 0,5 \cdot F_v$  nicht planmäßig vorgespannt, und das Lochspiel beträgt  $0,3 \text{ mm} < \Delta d \leq 2 \text{ mm}$ .
- c) SLP-Verbindungen mit Nieten oder Paßschrauben der Festigkeitsklasse 5.6. Sie erhalten keine Vorspannung, und das Lochspiel wird durch  $\Delta d \leq 0,3 \text{ mm}$  begrenzt.
- d) SLP-Verbindungen mit hochfesten Paßschrauben der Festigkeitsklasse 10.9. Die Schrauben werden nicht planmäßig vorgespannt mit  $F \geq 0,5 \cdot F_v$ , und als Lochspiel wird  $\Delta d \leq 0,3 \text{ mm}$  zugelassen.
- e) GV- und GVP-Verbindungen mit hochfesten Schrauben und mit hochfesten Paßschrauben der Festigkeitsklasse 10.9. Die Kontaktfläche zwischen den zu verbindenden Bauteilen wird aufgeraut und bearbeitet. Die Schrauben erhalten eine planmäßige Vorspannung mit  $F = 1,0 \cdot F_v$ . Das zulässige Lochspiel beträgt bei den hochfesten Schrauben  $0,3 \text{ mm} < \Delta d \leq 2 \text{ mm}$ . Bei den hochfesten Paßschrauben liegt die Begrenzung bei  $\Delta d \leq 0,3 \text{ mm}$ .

Die Bemessung der zu verbindenden Bauteile erfolgt z. Z. noch auf der Grundlage der zulässigen Spannungen. Jedoch soll die DIN 18 800 T 1 demnächst in einem weiteren Schritt dem internationalen Bemessungsverfahren angeglichen und dabei auf das Traglast-Niveau umgestellt werden, wobei dann  $\gamma$  fache Gebrauchslasten zugrunde gelegt werden.

Nach neueren Veröffentlichungen, wie z. B. bei VALTINAT /13/ oder wie im EUROCODE NR. 3 /1/ werden die Verbindungen für den Traglastzustand bemessen.

Nach VALTINAT /13/ errechnet sich die Lochleibungskraft

$$N_1 \leq R_1 = d \cdot (\sum t)_{\min} \cdot \sigma_{1,gr}$$

Hierin bedeuten:

$N_1$	= Lochleibungskraft
$R_1$	= rechnerische Tragfähigkeit einer Schraube auf Lochleibung
$d$	= Nenndurchmesser des Schraubenschaftes
$(\sum t)_{\min}$	= kleinste Summe der Blechdicken mit gleichgerichteter Lochleibungsbeanspruchung
$\sigma_{1,gr} = \alpha_i \cdot \beta_s$	= rechnerische Tragspannung auf Lochleibung
$\alpha_i$	= Faktor (vgl. Tab. 2.1)
$\beta_s$	= garantierte Mindestfließgrenze des Bauteilwerkstoffes

Den in Tabelle 2.1 aufgeführten  $\alpha_i$ -Faktoren liegen nachfolgend aufgeführte Mindestabstände zugrunde.

Mindestrandabstand in Kraftrichtung:  $e_1 = 2,0 d_L$

Mindestrandabstand rechtwinklig zur Kraftrichtung:  $e_2 = 1,5 d_L$

Mindestlochabstand:  $e = 3,0 d_L$

		Verbin- dung	$\alpha_i$ - Faktor
Typ A	Schrauben der Festigkeits- klasse 4.6 bis 10.9. Nicht planmäßig vorgespannt und ohne Kontaktflächenbehandlung.	SL	1,75
		SLP	2,0
Typ B	Schrauben der Festigkeits- klasse 10.9. Planmäßig vorgespannt nach DIN 1000 und ohne Kontaktflächen- behandlung.	SL	2,38
		SLP	2,63
Typ C	Schrauben der Festigkeits- klasse 10.9 Planmäßig vorgespannt nach DIN 1000 mit Kontaktflächenbehandlung	GV	3,0
		GVP	3,0

Tab. 2.1  $\alpha_i$ -Faktoren zur Ermittlung der  
Tragspannung auf Lochleibung.

Bei näherer Betrachtung von Tab. 2.1 fällt auf, daß die Schrauben ohne Vorspannung nicht gesondert aufgeführt sind, bzw. es ist davon auszugehen, daß sie Typ A zuzuordnen sind. Der Grund mag darin zu finden sein, daß bei den heute üblichen Montageabläufen - die Schrauben werden mit Schlagschraubern oder anderen elektrischen Geräten angezogen - ohnehin davon auszugehen ist, daß alle Schrauben geringfügig vorgespannt werden.

Die verschieden großen  $\alpha_i$ -Werte machen deutlich, daß durch Vorspannen der Schrauben ein erheblich größerer Lochleibungsdruck aufgenommen werden kann. Aufgrund der Vorspannkkräfte wird im Bauteil ein räumlicher Spannungszustand aufgebaut, der das Verformungsverhalten unter Nutzlast verbessert.

Im EUROCODE NR. 3 /1/ wird für die Lochleibungskraft im Abs. 6.2 nachfolgende Gleichung angegeben:

$$F_b^* = \alpha \cdot f_y \cdot d_n \cdot t$$

Für  $\alpha$  sind folgende Faktoren einzusetzen:

$$\alpha = e_1 : d \leq 3$$

$$\alpha = \frac{p}{d} - \frac{3}{4} \leq 3$$

Hierin bedeuten:

$F_b^*$  = Tragfähigkeit einer Schraube bei Lochleibungsbeanspruchung. Die Tragfähigkeit der gesamten Verbindung ist die Summe der Tragfähigkeiten aller Schrauben, der randnahen und der randfernen, wenn die Tragfähigkeiten auf Scheren diese Verteilung zulassen.

$f_y$  = spezifizierte Fließgrenze des Materials der angeschlossenen Teile

$d_n$  = Nenndurchmesser der Schrauben

$t$  = Dicke des angeschlossenen Teiles

$\alpha$  = Faktor

$d$  = Nenndurchmesser des Loches

$e_1$  = Randabstand in Kraftrichtung

$p$  = Lochabstand

Der Mindestrandabstand rechtwinklig zur Kraftrichtung beträgt 1,5 d.

Als eine Lücke in der Anwendung des Eurocodes ist anzusehen, daß für Schrauben mit und ohne Lochspiel mit gleichem Lochleibungsdruck zu rechnen ist. Schrauben mit nicht planmäßiger Vorspannung werden nicht aufgeführt. Ebenfalls sind keine Angaben über Schrauben gemacht, die planmäßig vorgespannt werden, bei denen aber die Kontaktfläche nicht bearbeitet wird.

Im EUROCODE NR. 3 werden im Abs. 6.6. die Verbindungen von dünnwandigen Bauteilen behandelt. Für Blindniete, Schrauben mit Muttern, Gewindeschrauben und Setzbolzen werden für die verschiedenen Versagensformen Rechenwege aufgezeigt.

Die Gleichungen für Schrauben mit Muttern gelten für die Festigkeitsklasse 8.8 und 10.9 und für die Schraubendurchmesser M 6 bis M 16. Nicht planmäßig vorgespannte oder planmäßig vorgespannte Schrauben werden nicht gesondert erfaßt.

Auch werden für Schrauben, deren Versagen durch Schiefstellung mit Lochleibungsversagen auftritt, keine Gleichungen zur Ermittlung der Tragfähigkeit angegeben. Häufig versagen jedoch einschneidige Verbindungen, indem die Bauteile sich so verformen, daß die Wirkungslinie der äußeren Kräfte mit den Achsen der Bleche übereinstimmt. Das ist nur durch eine Schrägstellung der Schraube möglich, die dann bei Erreichen der Traglast aus dem Bauteil herauskröpft.

In Abhängigkeit von der Bauteildicke und den Lochabständen werden im EUROCODE für das Lochleibungsversagen nachfolgende Gleichungen angegeben:

$$F_b^* = \alpha \cdot f_y \cdot d_n \cdot t$$

In Abhängigkeit von der Blechdicke  $t$  und dem Verhältnis des Randabstandes  $e_1$  zum Nenndurchmesser der Schrauben sind folgende  $\alpha$ -Werte anzunehmen:

bei  $t \leq 1$  mm ist

$$\alpha = 2,1$$

bei  $1 \text{ mm} < t < 3 \text{ mm}$

$$\frac{e_1}{d_n} \leq 6 \rightarrow \alpha_1$$

$$\frac{e_1}{d_n} > 6 \rightarrow \alpha_2$$

$$\alpha_1 = 2,6 - 0,5t + 0,9 (t-1) \ln \left( \frac{e_1}{d_n} \right)$$

$$\alpha_2 = 1,0 + 1,1 \cdot t$$

bei  $t \geq 3,0$  mm

$$\frac{e_1}{d_n} \leq 6 \rightarrow \alpha_1$$

$$\frac{e_1}{d_n} > 6 \rightarrow \alpha_2$$

$$\alpha_1 = 1,1 + 1,8 \ln \left( \frac{e_1}{d_n} \right)$$

$$\alpha_2 = 4,3$$

Verbindungen nach DIN 18 800 Teil 1 Tabelle 7	übertragbare Lochleibungskraft (kN)				
	DIN 18 800/1		Valtinat 1982	Eurocode Nr. 3 Ausgabe 1984	
	H	HZ		Abs 6.2	Abs.6.6
SL rohe Schrauben (DIN 7990), hochfeste Schrauben (DIN 6914) oder Senkschrauben (DIN 7969) Lochspiel $0,3 \text{ mm} < \Delta d \leq 2 \text{ mm}$ ohne Vorspannung	4,2	4,8	6,2	7,1 10,6 <sup>2)</sup>	7,6 8,3 <sup>2)</sup>
SL hochfeste Schrauben (DIN 6914) Lochspiel $0,3 \text{ mm} < \Delta d \leq 2 \text{ mm}$ nicht planm.Vorsp. $\geq 0,5 \cdot F_V$	5,7	6,5	6,2 8,4 <sup>1)</sup>		
SLP Niete (DIN 124 und DIN 302) Paßschrauben (DIN 7968) Lochspiel $\Delta d \leq 0,3 \text{ mm}$ ohne Vorspannung	4,8	5,4	7,1		
SLP hochfeste Paßschraube Lochspiel $\Delta d \leq 0,3 \text{ mm}$ nicht planm Vorsp. $\geq 0,5 \cdot F_V$	6,3	7,1	7,1 9,3 <sup>1)</sup>		

1) Vorspannkraft  $F = 1,0 \cdot F_V$ , keine Bearbeitung der Kontaktflächen

2) Vergrößerung des Mindestrandabstandes von 2,0 auf 3,0  $d_L$

Tab. 2.2 Gegenüberstellung der Berechnungsverfahren zur Ermittlung der übertragbaren Lochleibungskraft zur  $N_L$  für eine Schraube M 10 in einem Bauteil aus Stahl St 37 ( $t = 1,5 \text{ mm}$ ).

In Tab. 2.2 werden an einem Beispiel die bisher vorgestellten Rechenansätze miteinander verglichen. Der Berechnung wurde ein Stahl St 37-2 und eine Bauteildicke von  $t = 1,5 \text{ mm}$  zugrunde gelegt. Hierfür wurde die übertragbare Lochleibungskraft für eine Schraube M 10 ermittelt.

In Anlehnung an DIN 18 800 T 1 wurde als Mindestrandabstand in Kraftrichtung  $e_1 = 2 d_L$  gewählt und als Mindestrandabstand rechtwinklig zur Kraftrichtung  $e_2 = 1,5 d_L$ . Der Zahlenvergleich der nicht so hochwertigen SL-Verbindungen ergibt, daß es nach dem Eurocode möglich ist, die etwa 1,6fachen Kräfte in Ansatz zu bringen, wie sie sich nach DIN 18 800 T 1 errechnen. Bei den höherwertigen Schraubverbindungen mit nicht planmäßiger Vorspannung werden die Unterschiede geringer.

Für das von Valtinat /13/ veröffentlichte Berechnungsverfahren wurden auch die Kräfte ermittelt, die von einer planmäßig vorgespannten Schraube übertragen werden können, obwohl die Kontaktflächen nicht bearbeitet worden sind. Danach lassen sich bis zu 40 % höhere Lochleibungskräfte übertragen. Ebenfalls größere Tragfähigkeiten werden nach dem Berechnungsverfahren des Eurocodes erreicht: Wenn der Mindestrandabstand in Kraftrichtung von  $2,0 d_L$  auf  $3 d_L$  vergrößert wird, beträgt nach dem Berechnungsvorschlag in Abs. 6.2 die Erhöhung der Lochleibungskraft das 1,5fache.

In Abb. 2.1 sind für dünnwandige Bleche die  $\alpha$ -Faktoren, die zur Berechnung der rechnerischen Tragspannung nach dem Eurocode Nr. 3, Abs. 6.6 benötigt werden, für die Mindestrandabstände  $e_1 : d_L = 2, 4$  und  $6$  aufgetragen. Bei Blechdicken  $t \leq 1 \text{ mm}$  übt der Mindestrandabstand keinen Einfluß auf die Tragwirkung aus. Bei zunehmender Blechdicke bleibt der  $\alpha_i$ -Faktor für das Verhältnis  $e_1 : d_L = 2$  annähernd gleich. Bei  $t \leq 1 \text{ mm}$  beträgt  $\alpha = 2,1$  und bei  $t = 2,5 \text{ mm}$  wird  $\alpha = 2,3$  und verläuft im weiteren konstant.

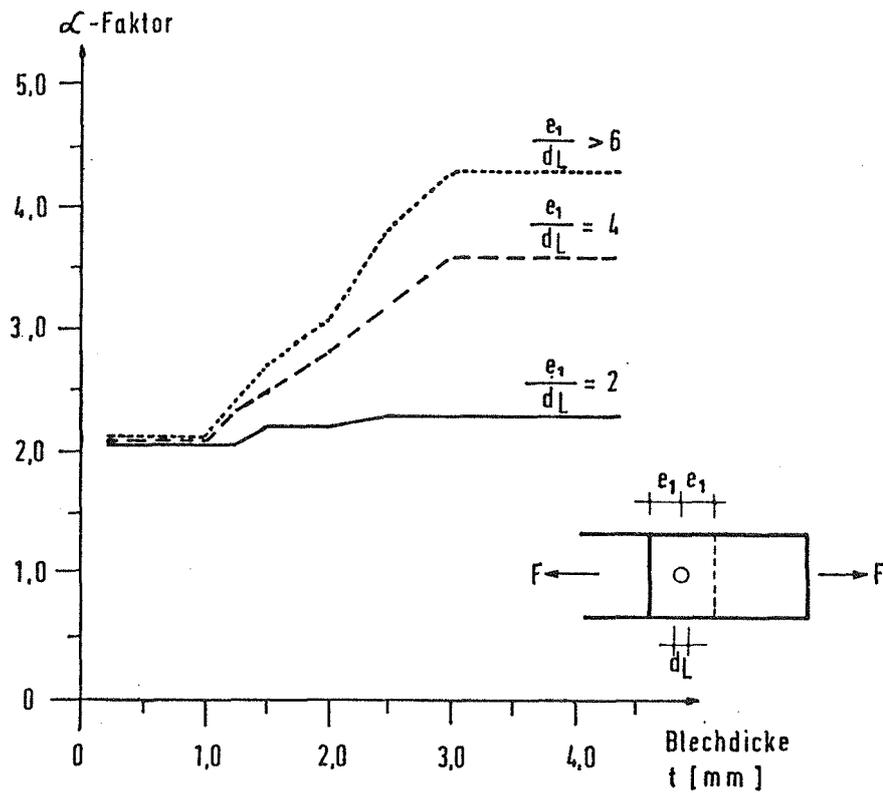


Abb. 2.1

$\alpha$ -Faktoren zur Berechnung der rechnerischen Tragspannung auf Lochleibung unter Berücksichtigung der Blechdicke  $t$  und dem Mindestrandabstand in Kraft-richtung  $\frac{e_1}{d_L}$  (nach Eurocode Nr.3)

Bei den Randabständen  $e_1 : d_L = 4$  und  $e_1 : d_L > 6$  liegen die Verhältnisse anders. Hier ist ein annähernd linearer Anstieg des  $\alpha$ -Wertes innerhalb der Blechdicken  $t > 1$  mm und  $t \leq 3$  mm ermittelt worden. Für  $e_1 : d_L = 4$  steigt der Faktor von 2,1 auf 3,6 an und für  $e_1 : d_L > 6$  von 2,1 auf 4,3 und bleibt dann weiterhin konstant.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß nach dem EUROCODE bei dickeren Blechen größere  $\alpha$ -Werte möglich sind, wenn die Mindestrandabstände in Krafrichtung  $e_1 : d_L$  größer als zwei sind.

### 3.0 Eigene Untersuchungen

#### 3.1 Versuchsprogramm

Das umfangreiche Versuchsprogramm ergab sich aus der Notwendigkeit, für jede Blechsorte, Blechdicke, Schraubengröße und Vorspannungsgrad je Parameterkombination 3 Versuche durchführen zu müssen. Daraus ergaben sich

$$(3 + 6 + 6 + 5) \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 = 540 \text{ Versuche.}$$

Für die mit Zink überzogenen Bleche standen für zwei Parameterkombinationen nur zwei, bzw. ein Versuchskörper zur Verfügung, so daß insgesamt für 534 Proben die Tragfähigkeit ermittelt werden mußte.

In Tab. 3.1 sind die durchgeführten Zugversuche aufgelistet. Die Form der untersuchten Versuchskörper ist in Abb. 3.1 dargestellt. Die Versuchskörper wurden im unverschraubten Zustand von den Herstellerfirmen angeliefert, wobei die Bleche der Produktion entnommen wurden und keinem besonderen Auswahlverfahren unterworfen worden waren.

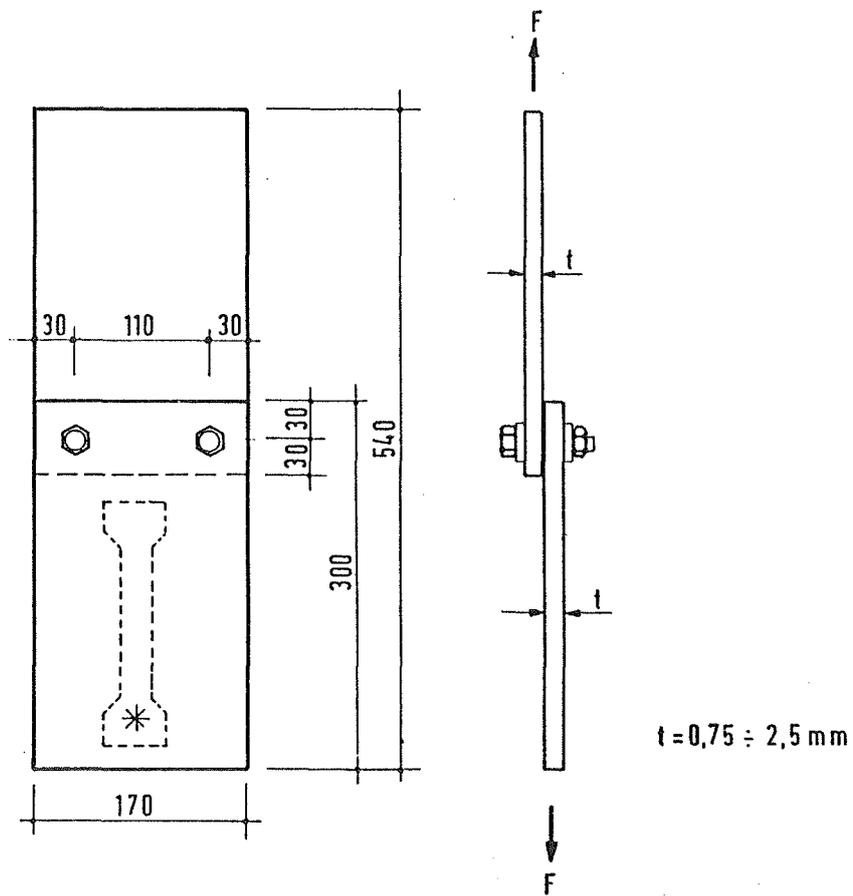
Zur Anwendung kamen aluminierete Bleche (AL), verzinkte Bleche (ZN), mit Kunststoff beschichtete Bleche (K) und emaillierte Bleche (EM). Im weiteren werden die Bleche aus Gründen der Vereinfachung mit den in den Klammern angegebenen Kurzbezeichnungen bezeichnet. Die untersuchten Bleche hatten die Dicken:

$$\begin{aligned} t &= 0,75 \text{ mm}, t = 1,00 \text{ mm}, t = 1,25 \text{ mm}, \\ t &= 1,50 \text{ mm}, t = 2,00 \text{ mm}, t = 2,50 \text{ mm} \end{aligned}$$

Sämtliche Versuche wurden am Institut für Stahlbau der TU-Braunschweig durchgeführt. Die Versuchsergebnisse sind in den Berichten Nr. 8100 /11/ und 8119 /12/ festgehalten.

Jedes Blech erhielt zwei Bohrungen, der gemittelte Lochdurchmesser ist in Tab. 3.2 für die Schraubengrößen M 8, M 10 und M 12 angegeben. Ermittelt wurden die Verhältnisse der Randabstände der Bohrungen in Krafrichtung  $e_1 : d_L$  und rechtwinklig zur Krafrichtung  $e_2 : d_L$ . Der Mittelwert des Verhältnisses wurde aus allen Lochdurchmessern einer Blechsorte errechnet. Er ergab als kleinsten Wert für die Schraube M 12  $2,1 d_L$ . Die größten gemittelten Randabstände der Schraube M 8 betragen  $3,1 d_L$ . Nach DIN 18 800 Teil 1 sind als minimale Randabstände in Krafrichtung  $2,0 d_L$  und rechtwinklig zur Krafrichtung  $1,5 d_L$  zulässig.

Durch den Abstand der Schrauben vom Rand und quer zur Krafrichtung werden die Traglasten beeinflusst. Der Abstand in Querrichtung ist insofern von Bedeutung, da bei einschnittigen Verbindungen immer Außermittigkeiten auftreten, die je nach Schraubenabstand auf unterschiedliche Biegesteifigkeiten und Biegefestigkeiten treffen. Die hier gewählten Schraubenabstände quer zur Krafrichtung  $e = 110 \text{ mm}$  sind größer als sie in der Praxis üblich sind. Es ergibt sich jedoch ein praxisnaher Abstand  $e = 85 \text{ mm}$ , wenn beide Schrauben auf die Versuchskörperbreite bezogen werden.



Schrauben	DIN 933 / 10.9	( M8, M10, M12)
Muttern	DIN 934 / 10.9	( M8, M10, M12 )
Scheiben	13 DIN 6916	( beidseitig bei M8)
Scheiben	B 10,5 DIN 125-St.	( beidseitig bei M10)
Scheiben	A 8,4 DIN 125-St.	( beidseitig bei M12)

\* Entnahme der Zugproben

Abb. 3.1  
Versuchskörper

Die Versuchskörper bestanden aus zwei Blechen (vgl. Abb. 3.1), die jeweils mit zwei einschnittig wirkenden Schrauben miteinander verbunden wurden. Es wurden Schrauben der Größe M 8, M 10 und M 12 der Festigkeitsklasse 10.9 verwendet. Der Vorspanngrad der Schrauben wurde mit  $F = 0$ ,  $F = 0,5 F_v$  und  $F = 1,0 F_v$  variiert. Hierbei betrug:

$$F_v = 24 \text{ kN und } M_a = 35 \text{ Nm (Schraube M 8 / 10.9)}$$

$$F_v = 35 \text{ kN und } M_a = 70 \text{ Nm (Schraube M 10 / 10.9)}$$

$$F_v = 50 \text{ kN und } M_a = 122 \text{ Nm (Schraube M 12 / 10.9)}$$

Stahlbleche	Blechdicke t (mm)					
	0,75	1,0	1,25	1,5	2,0	2,5
aluminert (AL)	○	○		○		
verzinkt (ZN)	○	○	○	○	○	○
kunststoffbeschichtet (K)	○	○	○	○	○	○
emailliert (EM)	○	○	○	○	○	

Tab. 3.1 Durchgeführtes Versuchsprogramm

mit den Schraubengrößen: M 8, M 10 und M 12

und den Vorspanngraden:  $F = 0$ ;  $0,5 F_v$  und  $1,0 F_v$

(3 Versuche je Parameterkombination)

Blech	Schrauben	gemittelter Lochdurch- messer $d_L$ (mm)	Randabstände	
			in Kraft- richtung $e_1/d_L$	rechth. zur Kraftrichtung $e_2/d_L$
AL	M 8	10	3,0	3,0
	M 10	12	2,5	2,5
	M 12	14	2,1	2,1
ZN	M 8	10	3,0	3,0
	M 10	12	2,5	2,5
	M 12	14	2,1	2,1
K	M 8	9,8	3,1	3,1
	M 10	11,8	2,5	2,5
	M 12	13,8	2,2	2,2
EM	M 8	9,7	3,1	3,1
	M 10	11,6	2,6	2,6
	M 12	13,5	2,2	2,2

Tab. 3.2 Mittlere Lochdurchmesser und deren Anordnung  
im Blech

### 3.2 Statistische Auswertung

Zur Auswertung der Meßergebnisse wurden die nachfolgend aufgeführten statistischen Kenngrößen herangezogen bzw. Rechenwege beschritten. Als ein wesentlicher statistischer Kennwert ist der Mittelwert anzusehen, der aber besser als arithmetisches Mittel bezeichnet wird. Der Mittelwert  $\bar{x}$  ist gleich der Summe aller Beobachtungswerte  $x_i$  dividiert durch die Anzahl  $n$  der Elemente

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Die Streuung der Beobachtungswerte um den Mittelwert wird durch die Standardabweichung  $s$  oder deren Quadrat, die Varianz  $s^2$ , zum Ausdruck gebracht

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2$$

In der weiteren statistischen Auswertung, d. h. beim Schätzen von Kennwerten, wurde davon ausgegangen, daß die Grundgesamtheit normal verteilt war. Für die Stichprobenzahl  $n > 100$  wurde die Gaußsche Normalverteilung angewendet und für Stichprobenzahlen  $n < 100$  wurde die Abzisse der Normalverteilung durch die sog.  $t$ -Verteilung ersetzt. Die Verteilung ist von  $n$  abhängig. Als Vertrauensgrenze wurde die im Bauwesen übliche 95%-Fraktile gewählt. Somit ergibt sich der Vertrauensbereich des Mittelwertes:

$$\bar{x} - t \cdot s \leq R \leq \bar{x} + t \cdot s$$

unterer Wert der	oberer Wert der
95%-Fraktile	95%-Fraktile

Hierin bedeuten:

$\bar{x}$  = Mittelwert

t = Abzissenwert der Normalverteilung  
bzw. t-Verteilung

s = Standardabweichung

n = Stichprobenzahl

Die statistische Auswertung der Blechdicken, der Gesamtdicken und der Beschichtungsdicken erfolgte auf dieser Grundlage. Hier standen n = 48 Beobachtungswerte zur Verfügung.

Im Eurocode Nr. 3 ist im Abschnitt 8.6 ein Verfahren angegeben, wie Versuchswerte ohne eine rechnerische Abstützung ausgewertet werden können. Der Bemessungswert der Tragfähigkeit  $x^*$  ergibt sich aus:

$$x^* = \frac{\bar{x}}{\gamma_m}$$

Es sind:

$$\gamma_m = 1 + 1,33 \frac{w}{C_n \cdot \bar{x}}$$

$$w = x_{i,\max} - x_{i,\min} \quad (\text{größte Streubreite})$$

$C_n$  ist abhängig von der Zahl n der untersuchten Beobachtungswerte. Bei n = 3 beträgt  $C_n = 1,91$ , bei n = 10 beträgt  $C_n = 3,16$ . Dieses statistische Rechenverfahren wurde bei kleineren Stichprobenzahlen angewendet und zwar bei den Berechnungen der Zugfestigkeit, der Streckgrenze und der Bruchdehnung der Zugproben, sowie bei der Auswertung der Tragfähigkeit und der Verschiebungswege. Des weiteren wurden lineare Regressionsanalysen durchgeführt, um eventuelle Tendenzen feststellen zu können. Ein Maß für die Genauigkeit der Regressionsgerade stellt der Korrelationskoeffizient r dar. Nähert sich r dem Wert 1 oder beträgt r = - 1, so besteht eine absolute Übereinstimmung.

#### 4.0 Werkstoffuntersuchungen

##### 4.1 Beschichtungs- und Überzugsdicke der Bleche

In DIN 55 928 Teil 1 /10/ sind die Begriffe Beschichtung und Überzug definiert. Unter Beschichtung versteht man eine oder mehrere in sich zusammenhängende Schichten auf einem Stahluntergrund, deren Bindemittel organischer oder anorganischer Natur sind. Ein Überzug ist der Sammelbegriff für eine oder mehrere Schichten aus Metallen auf einem Stahluntergrund. Jedoch ist es üblich, beide Begriffe synonym zu gebrauchen.

Stichprobenartig wurde für jede Blechdicke, an jeweils 3 Versuchskörpern, auf der Oberseite und auf der Unterseite der Versuchskörper die Dicke des Überzuges bzw. die der Beschichtung gemessen. Die Messung erfolgte mit einem Dickenschichtmeßgerät MINITEST FD.

In Tab. 4.1 sind die mittleren Dicken des Überzuges bzw. die der Beschichtungen aus allen Blechdicken für die vier untersuchten Blechsorten angegeben. Ebenfalls mit aufgeführt sind die größte und kleinste gemessene Blechdicke. Detaillierte Angaben über die Überzüge und über die Beschichtungen und deren statistische Auswertung sind den in Tab. 4.1 aufgeführten Abbildungen zu entnehmen.

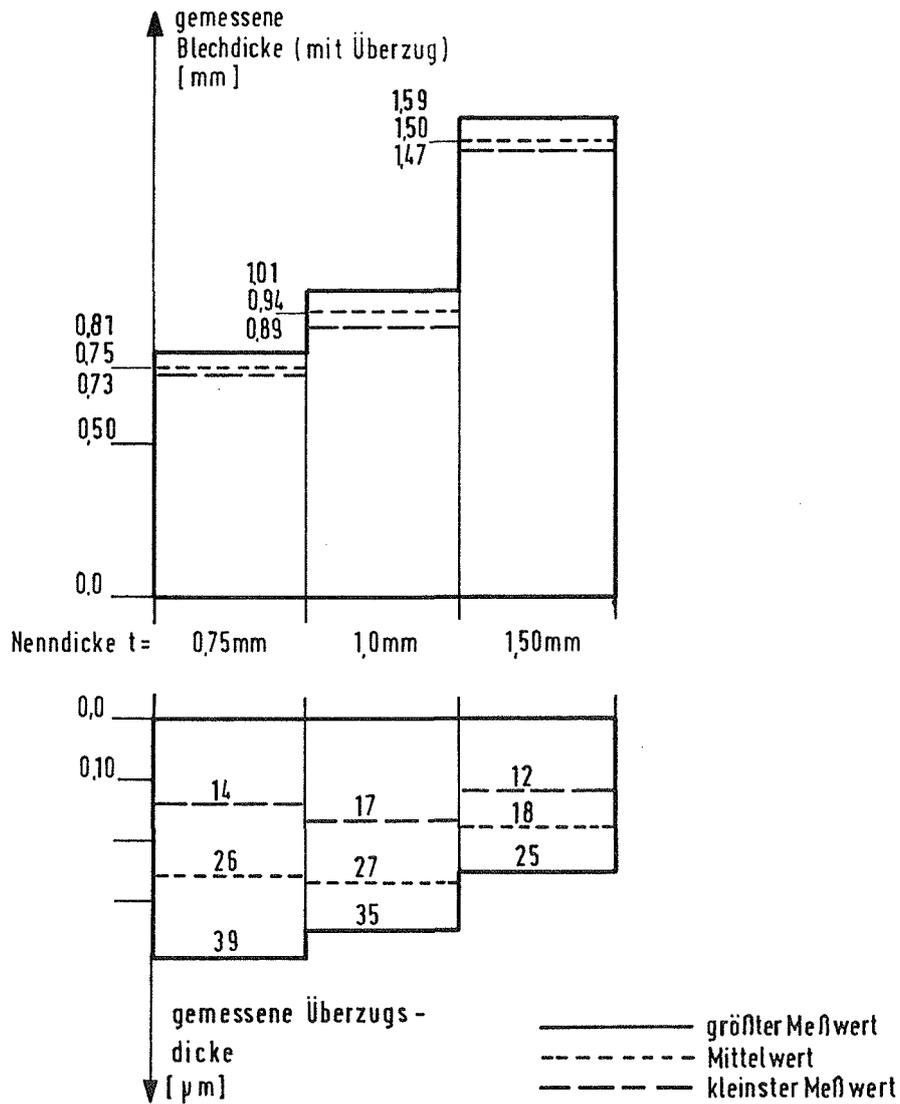
Zusammenfassend wird festgestellt, daß die Dicke der Beschichtung innerhalb einer Bandbreite von etwa + 50 % um den Mittelwert streut. Bei besonders korrosionsgefährdeten Blechen ist es daher unbedingt erforderlich, die Oberflächenbeschichtung zu prüfen und maßabweichende Bleche auszusortieren.

Blech	Mittelwert ( $\mu\text{m}$ )	Meßwert		Detaillierte Angaben
		größter ( $\mu\text{m}$ )	kleinster ( $\mu\text{m}$ )	
AL aluminieret	24	39	12	Abb. 4.1.1 Abb. 4.1.2
Z verzinkt	19	34	9	Abb. 4.2.1 Abb. 4.2.2
K kunststoffbeschichtet	199	285	119	Abb. 4.3.1 Abb. 4.3.2
EM emailliert	348	493	249	Abb. 4.4.1 Abb. 4.4.2

Tab. 4.1

Gemessene Dicke des Überzuges bzw. der Beschichtung

**BLECHDICKE (mit Überzug)**  
(Anzahl der Meßpunkte n=108)



**ÜBERZUGSDICKE**  
(Anzahl der Meßpunkte n=48)

**Abb. 4.1.1**  
**Gemessene Blechdicken (mit Überzügen) und Überzugsdicken der aluinierten Bleche**

BLECHDICKE (mit Überzug)  
(Anzahl der Meßpunkte n=108)

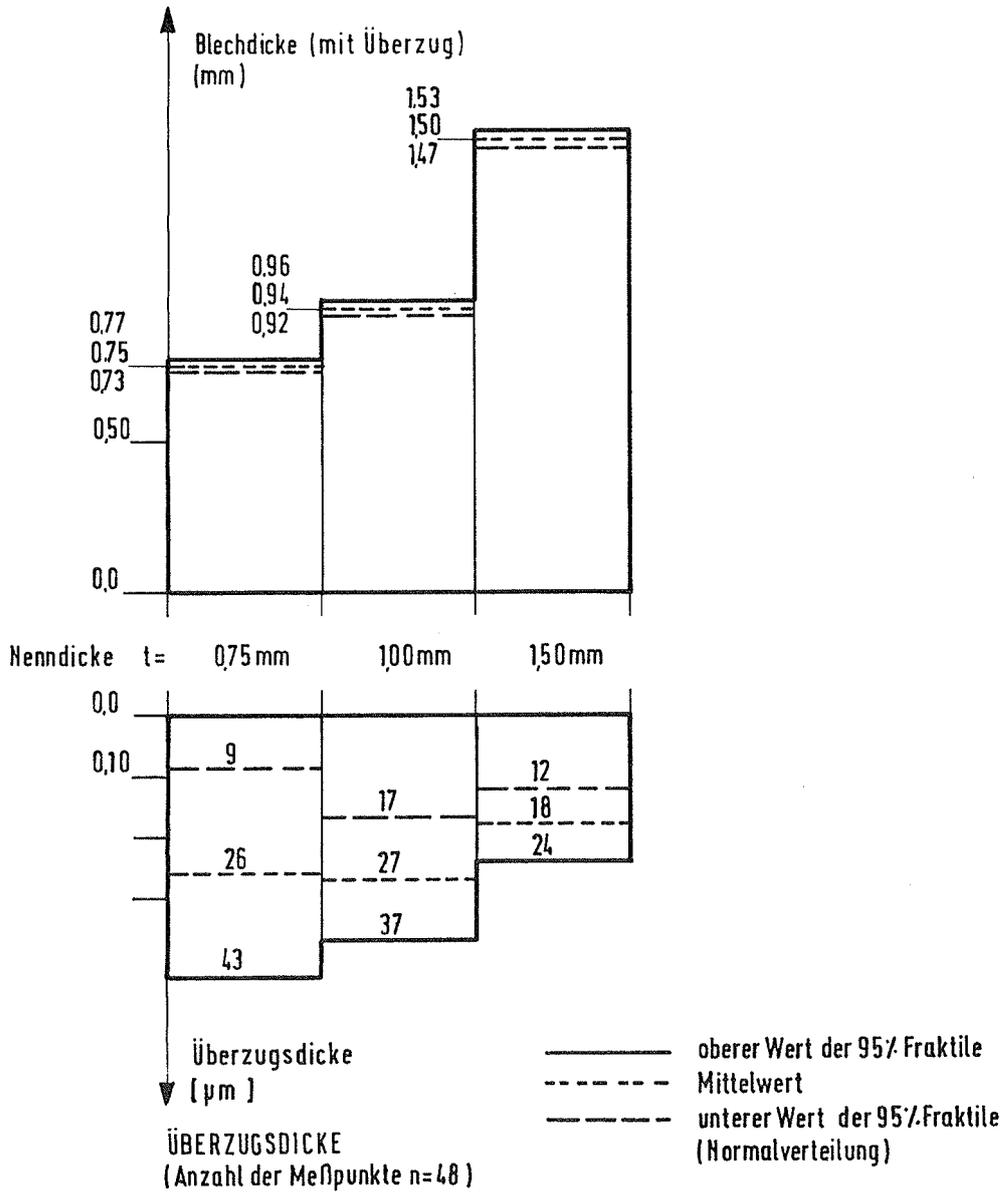
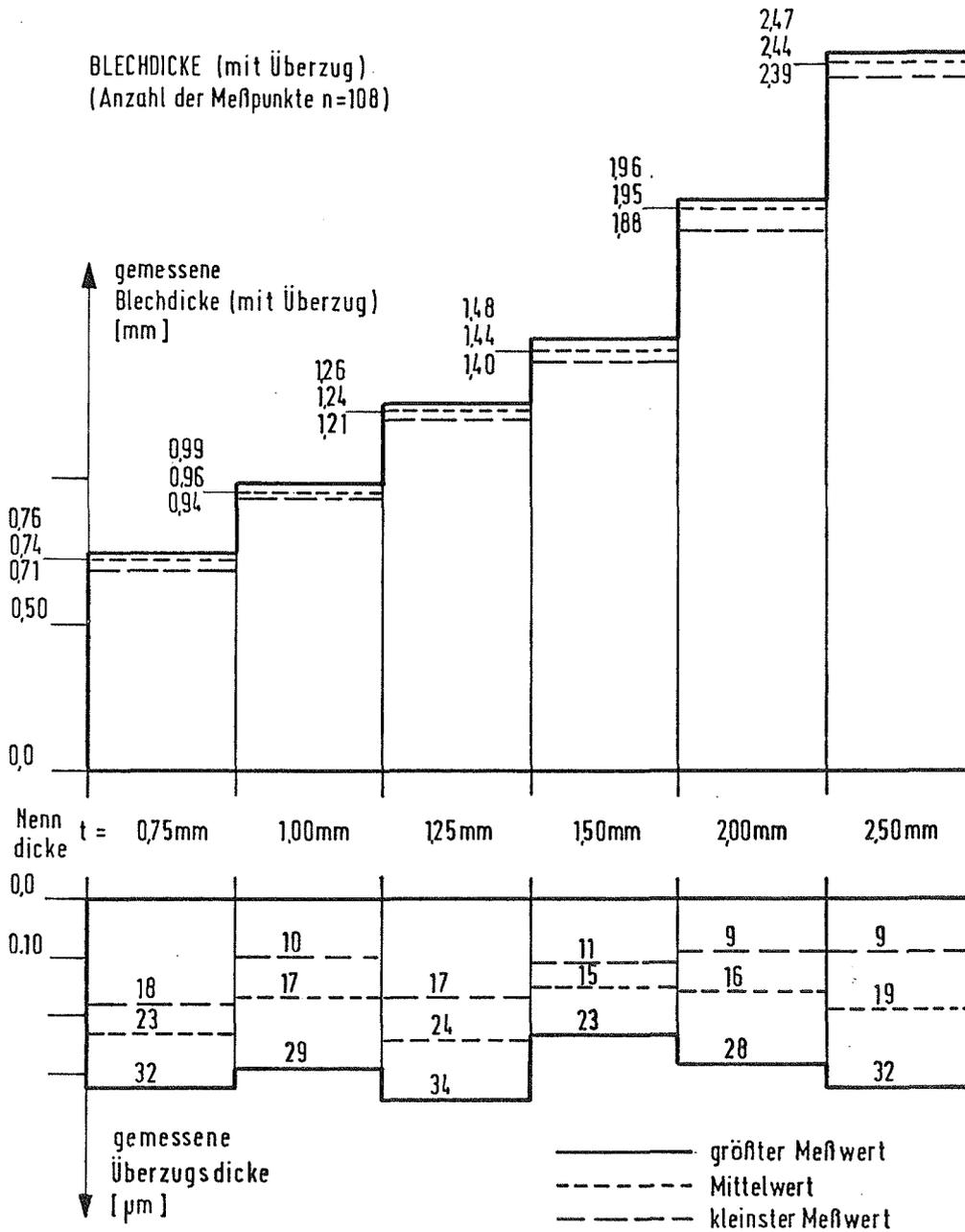


Abb. 4.1.2

Statistische Auswertung der gemessenen Blechdicken (mit Überzügen) und Überzugsdicken der aluminieren Bleche



**ÜBERZUGSDICKE**  
(Anzahl der Meßpunkte n=48)

Abb. 4.2.1  
Gemessene Blechdicken (mit Überzügen) und Überzugsdicken der verzinkten Bleche

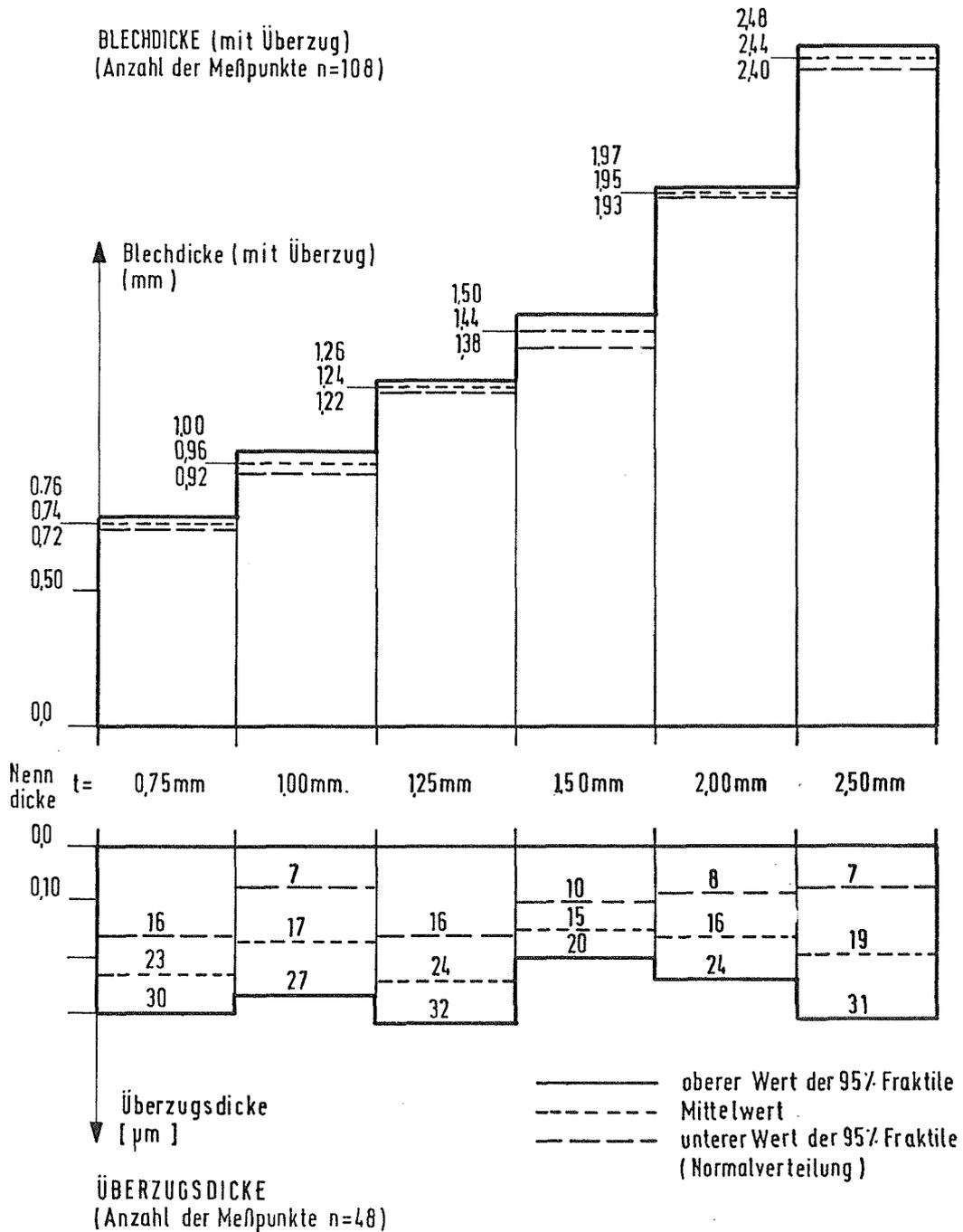


Abb. 4.2.2

Statistische Auswertung der gemessenen Blechdicken (mit Überzügen) und Überzugsdicken der verzinkten Bleche

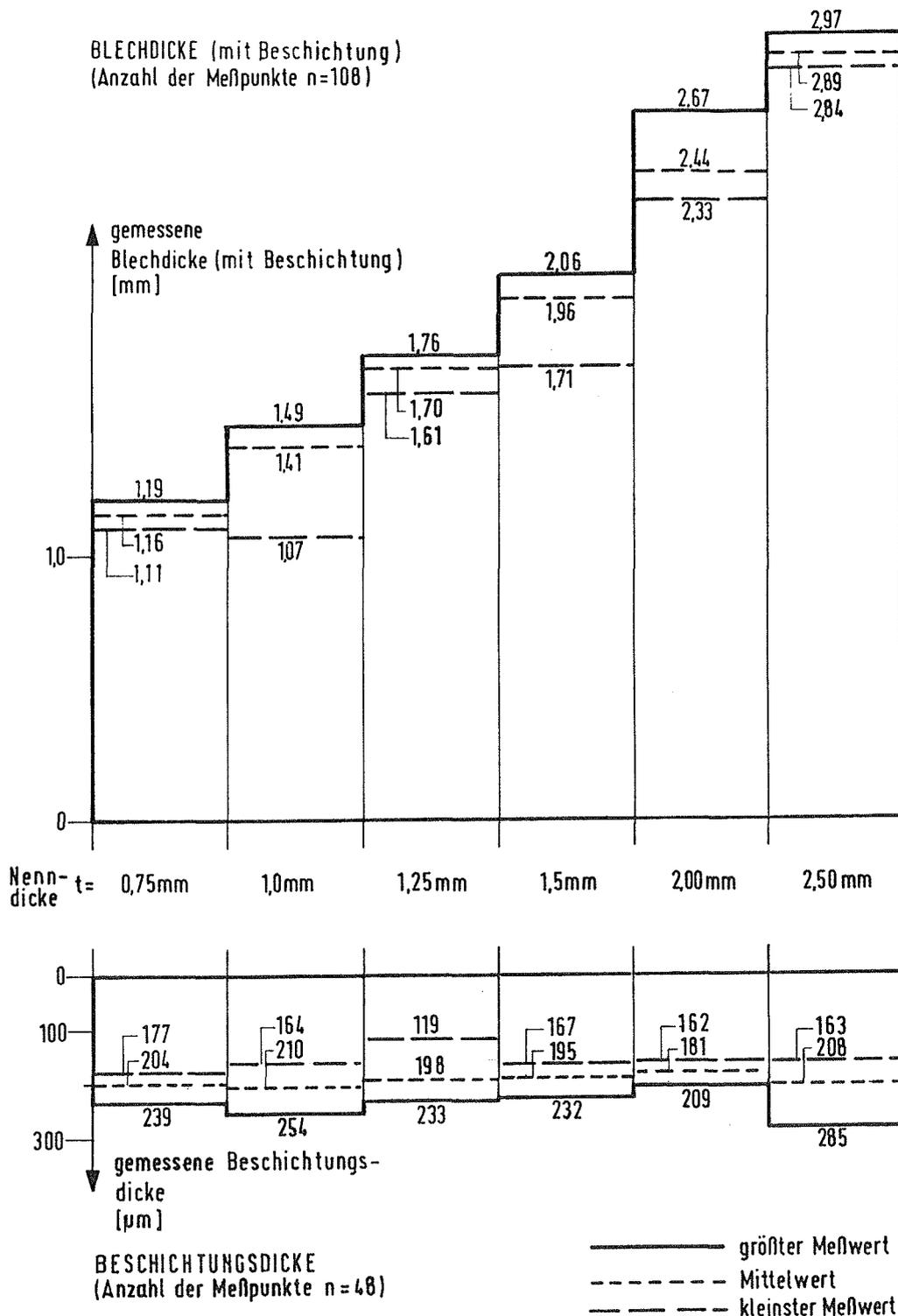


Abb. 4.3.1  
Gemessene Blechdicken (mit Beschichtungen) und Beschichtungsdicken der kunststoffbeschichteten Bleche

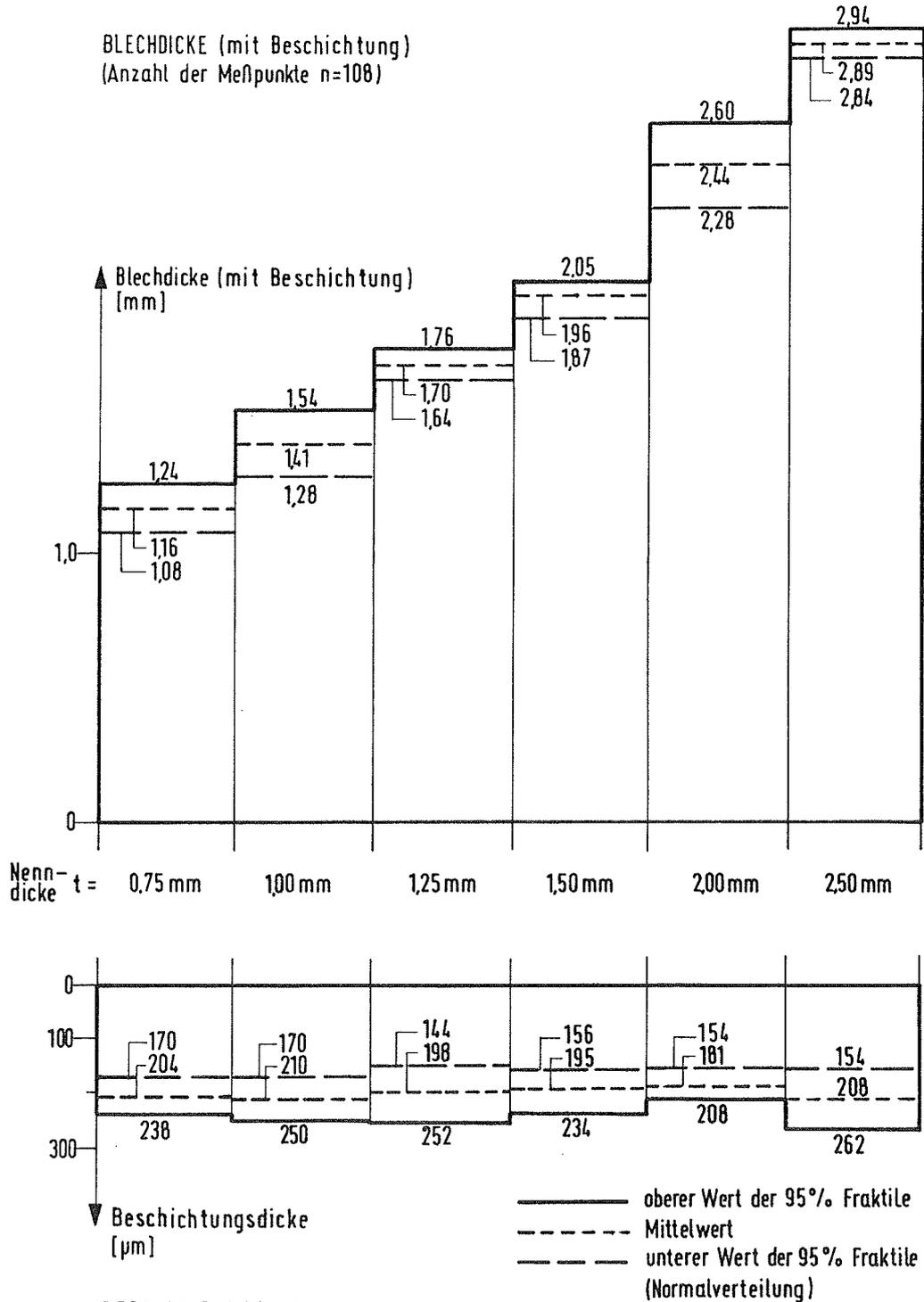
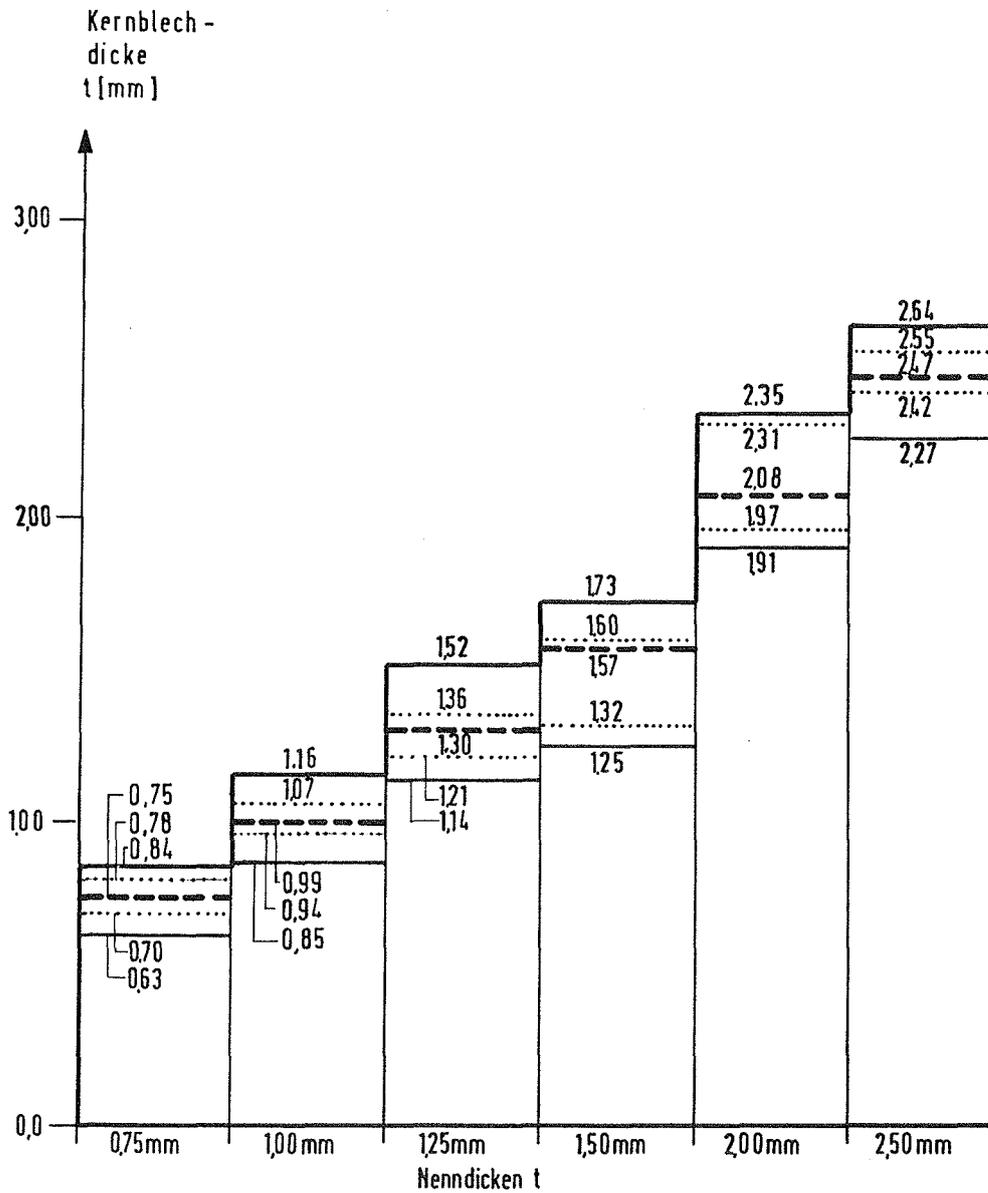


Abb. 4.3.2  
 Statistische Auswertung der gemessenen Blechdicken (mit Beschichtungen) und Beschichtungsdicken der kunststoffbeschichteten Bleche



- mittlere Blechdicke minus mittlerer Beschichtungsdicke
- ..... größte Blechdicke minus mittlerer Beschichtungsdicke
- · - · - kleinste Blechdicke minus mittlerer Beschichtungsdicke
- größte Blechdicke minus kleinster Beschichtungsdicke
- kleinste Blechdicke minus größter Beschichtungsdicke

Abb. 4.3.3  
Ermittlung der Kernblechdicken der  
kunststoffbeschichteten Bleche  
(größte mögliche Spannweite)

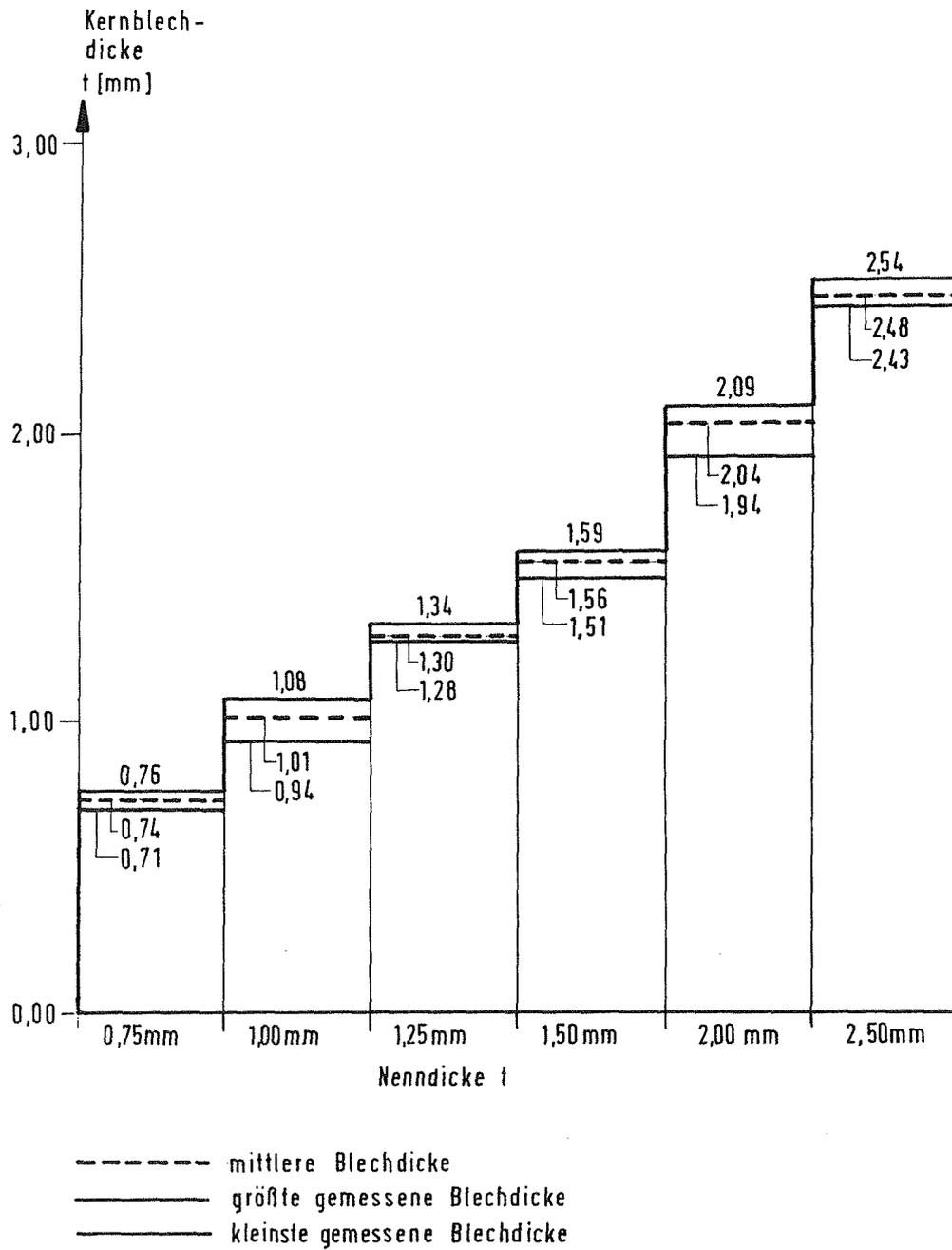


Abb. 4.3.4  
Ermittlung der Kernblechdicken der  
kunststoffbeschichteten Bleche  
(aus 3 Stichproben je Blechdicke)

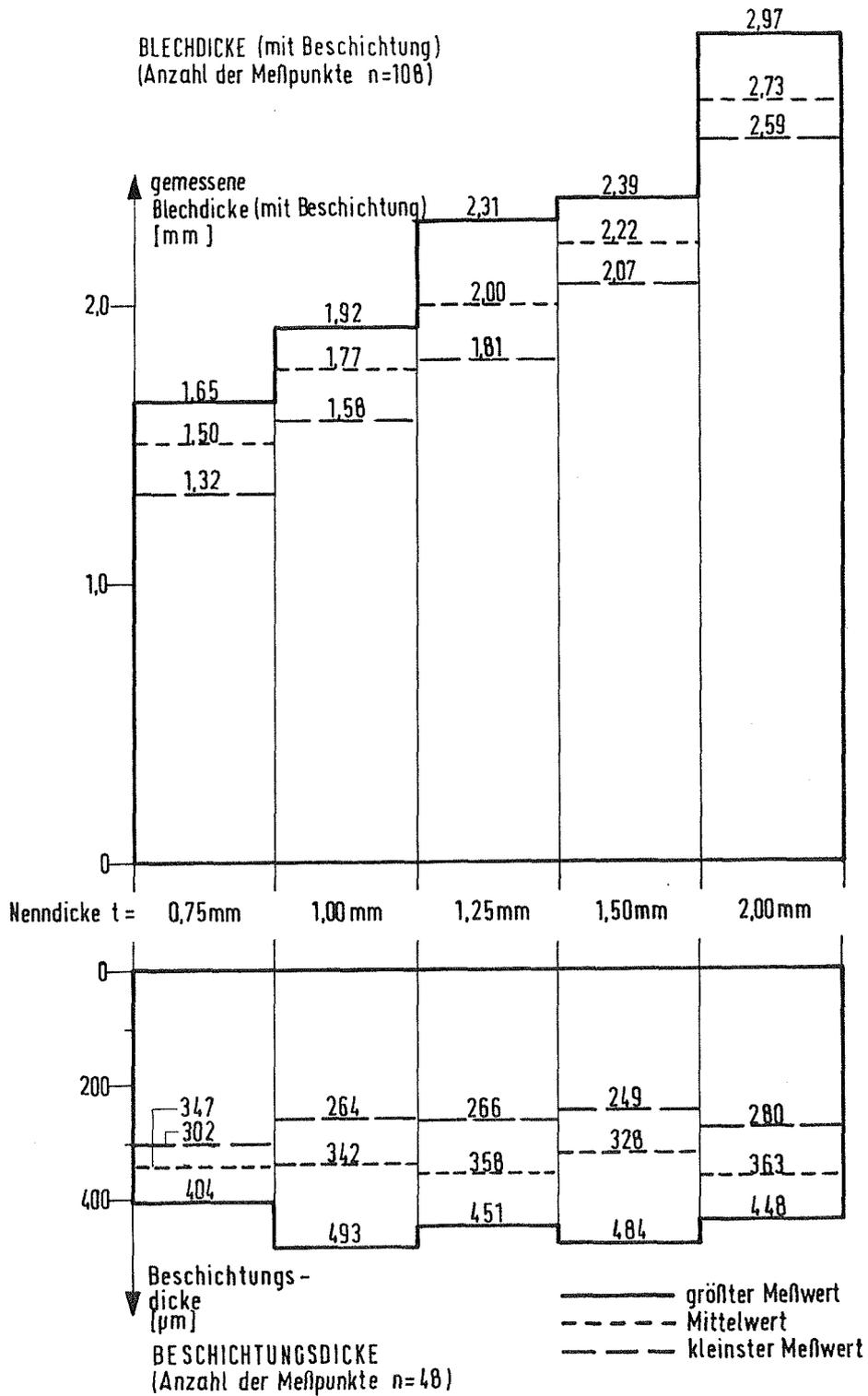


Abb. 4.4.1  
Gemessene Blechdicken (mit Beschichtungen) und Beschichtungsdicken der emaillierten Bleche

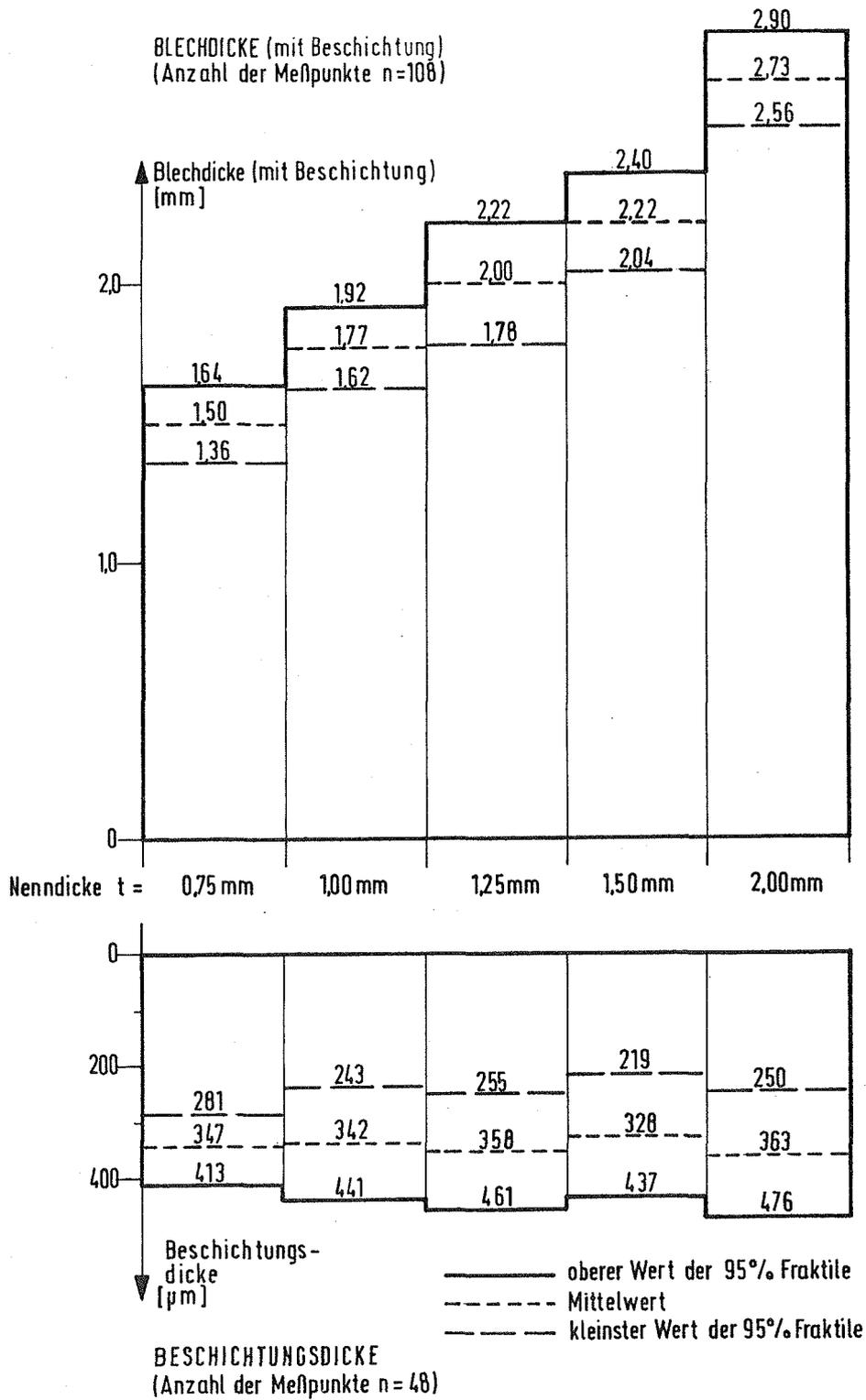
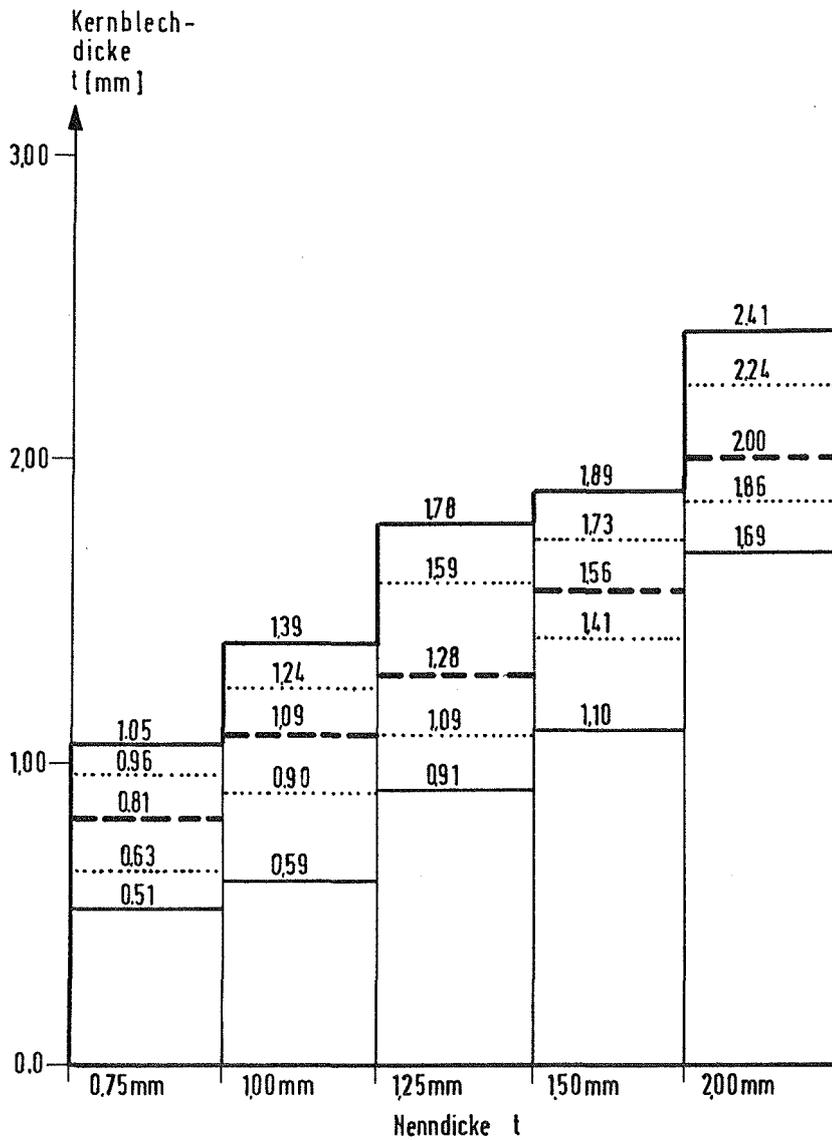


Abb. 4.4.2  
 Statistische Auswertung der gemessenen Blechdicken (mit Beschichtungen) und Beschichtungsdicken der emailierten Bleche



- mittlere Blechdicke minus mittlerer Beschichtungsdicke
- ..... größte Blechdicke minus mittlerer Beschichtungsdicke
- ..... kleinste Blechdicke minus mittlerer Beschichtungsdicke
- größte Blechdicke minus kleinster Beschichtungsdicke
- kleinste Blechdicke minus größter Beschichtungsdicke

**Abb. 4.4.3**  
**Ermittlung der Kernblechdicken**  
**der emaillierten Bleche**  
 (größte mögliche Spannweite)

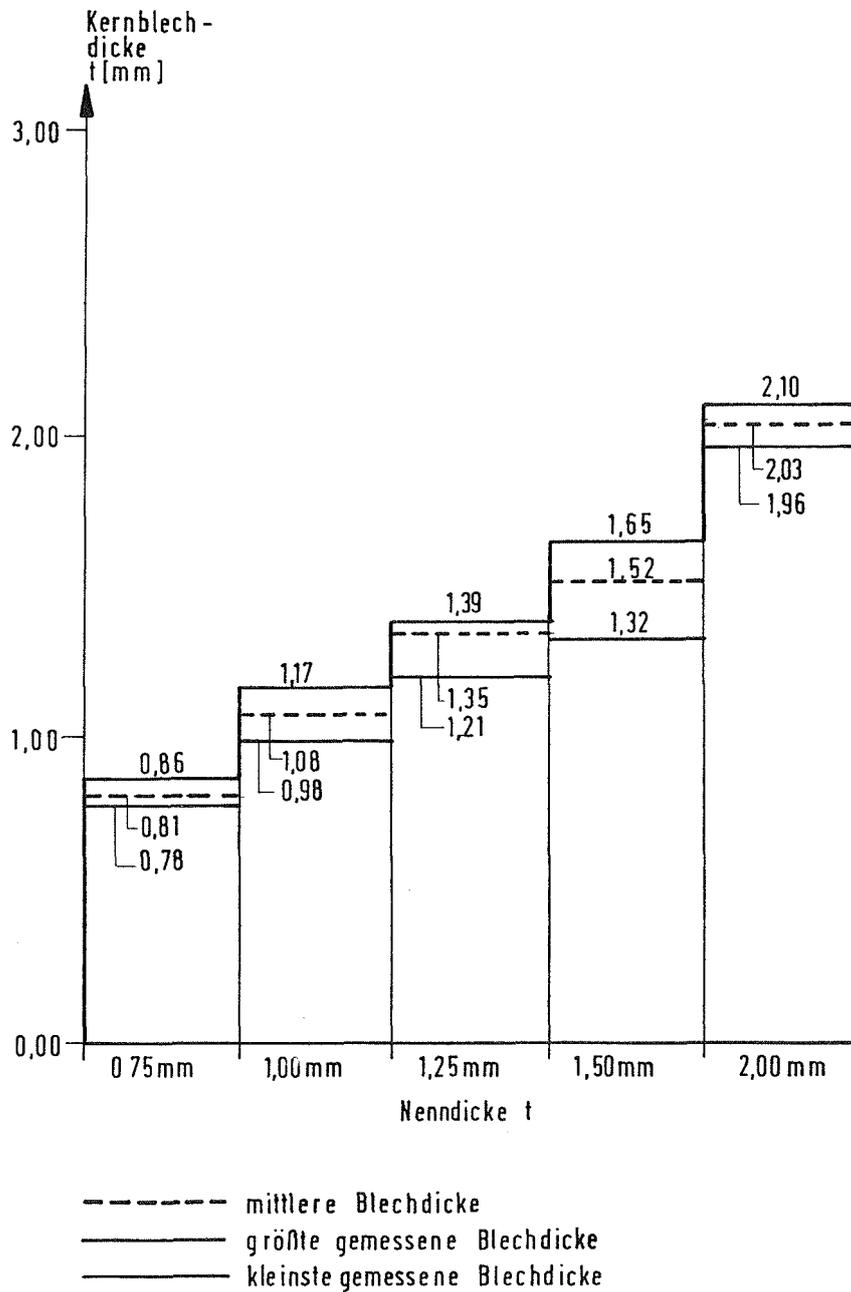


Abb. 4.4.4  
Ermittlung der Kernblechdicken der  
emaillierten Bleche (aus 3 Stichproben je Blechdicken)

## 4.2 Blechdicke

Vor dem Zusammenbau der Versuchskörper wurden die Blechdicken im Bereich der Löcher gemessen. Die Meßergebnisse und deren statistische Auswertung sind in den Abb. 4.1.1 bis Abb. 4.4.4 dargestellt.

Bei den aluminieren und verzinkten Blechen ist das Verhältnis der Überzugsdicke zur Kernblechdicke klein. Deshalb wurde bei der weiteren Auswertung die Gesamtdicke der Kernblechdicke gleichgesetzt.

Für die kunststoffbeschichteten und emaillierten Bleche wurde die Kernblechdicke ermittelt, da die Beschichtungen dicker sind und sich die Festigkeitseigenschaften zwischen Stahl und Beschichtung grundlegend unterscheiden.

In Abb. 4.3.4 sind die gemessenen Blechdicken von 3 stichprobenartig ausgewählten Versuchskörpern für die kunststoffbeschichteten Bleche aufgetragen und in Abb. 4.4.4 für die emaillierten Bleche. Hierbei wurde vor dem Zusammenbau an jedem Blech an 4 Punkten auf der Oberseite und auf der Unterseite die Beschichtung bestimmt. Daraus die mittlere Dicke der Beschichtung ermittelt und diese von der an zwei Punkten gemessenen und gemittelten Gesamtdicke subtrahiert.

Eine statistische Auswertung aller Versuchskörper ist in Abb. 4.3.3 für die kunststoffbeschichteten und in Abb. 4.4.3 für die emaillierten Bleche dargestellt. Hier wurden verschiedene Kombinationsmöglichkeiten zur Ermittlung der tatsächlichen Blechdicke angewendet:

1. Von dem Mittelwert aller gemessenen Gesamtdicken einer Nenndicke wurde die mittlere Beschichtungsdicke der Nenndicke subtrahiert.
2. Von der größten gemessenen Blechdicke wurde die mittlere Beschichtungsdicke abgezogen.
3. Von der kleinsten gemessenen Blechdicke wurde die mittlere Beschichtungsdicke abgezogen.
4. Von der größten gemessenen Blechdicke wurde die kleinste gemessene Beschichtungsdicke subtrahiert.
5. Von der kleinsten gemessenen Blechdicke wurde die größte gemessene Beschichtungsdicke subtrahiert.

Die unter 1. errechneten Blechdicken zeigen eine gute Übereinstimmung mit den stichprobenartig in Abb. 4.3.4 und 4.4.4 ermittelten Blechdicken. Die nach den Kombinationen 2 und 3 ermittelten tatsächlichen Blechdicken erscheinen möglich. Die Bestimmung der Blechdicken nach Punkt 4. und 5. erscheint unwahrscheinlich. Es kann davon ausgegangen werden, daß diese Blechdicken von den Versuchskörpern nicht erreicht wurden.

In DIN 1541 /2/ sind die zulässigen Maß- und Formabweichungen für Bleche geregelt. In Abhängigkeit von der Nenndicke und Nennbreite werden zulässige Regelabweichungen für Bleche nach DIN 1623 Teil 1 (weiche unlegierte Stähle zum Kaltumformen) /3/ angegeben. Für die kaltgewalzten allgemeinen Baustähle nach DIN 1623 Teil 2 /4/ ist eine Erhöhung der zulässigen Abweichung um 10 % möglich. Die Werte gelten für jeden Meßpunkt mit mindestens 40 mm Abstand von den Kanten. Bei einer Nennbreite von  $b < 1200$  mm ergeben sich folgende zulässige Regelabweichungen:

Nennstärke (mm)	Regelabweichungen	
	nach DIN 1623/1 (weiche unlegierte Stähle) (mm)	nach DIN 1623/2 (kaltgewalzte allg. Stähle) (mm)
0,75	$\pm 0,06$	$\pm 0,07$
1,00	$\pm 0,07$	$\pm 0,08$
1,25	$\pm 0,08$	$\pm 0,09$
1,50	$\pm 0,10$	$\pm 0,11$
2,00	$\pm 0,12$	$\pm 0,13$
2,50	$\pm 0,14$	$\pm 0,15$

Tab. 4.2

Zulässige Regelabweichung von der Nennblechdicke  
nach DIN 1541 /2/.

Blech	Nenn- dicke t (mm)	Mittelwert	Meßwert		95 % Fraktile	
			größter	kleinster	oberer Wert	unterer Wert
AL	0,75	(0,75)	0,81	0,73	0,77	0,73
	1,00	0,94	1,01	<u>0,89</u>	0,96	0,92
	1,50	(1,50)	1,59	1,47	1,53	1,47
ZN	0,75	0,74	0,76	0,71	0,76	0,72
	1,00	0,96	0,99	0,94	1,00	0,92
	1,25	1,24	1,26	1,21	1,26	1,22
	1,50	1,44	1,48	1,40	1,50	<u>1,38</u>
	2,00	1,95	1,96	1,88	1,97	1,93
	2,50	2,44	2,47	2,39	2,48	2,40

(....) Nenn-  
dicke

.... zulässige Überschreitung der Nenn-  
dicke

.... zulässige Unterschreitung der Nenn-  
dicke

.... Überschreitung der Nenn-  
dicke

.... Unterschreitung der Nenn-  
dicke

Tab. 4.3

Regelabweichung der Nennblechdicke nach DIN 1541 /2/ für alumi-  
nierte und verzinkte Bleche (hierzu vgl. Abb. 4.1.1 bis Abb. 4.2.2.)

Blech	Nenn- dicke t (mm)	mittlere Gesamtdicke minus mittlerer Beschichtungsdicke (mm)	größte Gesamtdicke minus größter Beschichtungsdicke (mm)	kleinste Gesamtdicke minus kleinster Beschichtungsdicke (mm)	obere 95% Gesamtdicke minus oberer 95% Beschichtungsdicke (mm)	untere 95% Gesamtdicke minus unterer 95% Beschichtungsdicke (mm)
K	0.75	(0.75)	0.71	0.76	0.76	0.74
	1.00	0.99	0.98	1.03	1.04	0.94
	1.25	1.30	1.29	<u>1.37</u>	1.26	<u>1.35</u>
	1.50	1.57	1.60	<u>1.38</u>	1.58	1.56
	2.00	2.08	<u>2.25</u>	2.01	<u>2.18</u>	1.97
	2.50	2.47	2.40	2.51	2.42	2.53
EM	0.75	0.81	<u>0.84</u>	0.72	0.81	0.80
	1.00	<u>1.09</u>	0.93	1.05	1.04	<u>1.13</u>
	1.25	1.28	<u>1.41</u>	1.28	1.30	1.27
	1.50	1.56	1.42	1.57	1.53	1.60
	2.00	(2.00)	2.07	2.03	1.95	2.06

- (.....) Nenn-  
dicke
- ..... zulässige Überschreitung der Nenn-  
dicke
- ..... zulässige Unterschreitung der Nenn-  
dicke
- ..... Überschreitung der Nenn-  
dicke
- ..... Unterschreitung der Nenn-  
dicke

Tab. 4.4 Regelabweichung der Nennblechdicke nach DIN 1541 für kunststoff-  
beschichtete und emaillierte Bleche (hierzu vergleiche Abb. 4.31 bis Abb. 4.44)

In Tab. 4.3 wird für die aluminieren und für die verzinkten Bleche untersucht, inwieweit die zulässige Regelabweichung von der Nennblechdicke eingehalten, bzw. über- oder unterschritten wird.

Bei den aluminieren Blechen entspricht der Mittelwert für  $t = 0,75$  mm und  $t = 1,50$  mm der Nenndicke. Der Mittelwert für  $t = 1,00$  mm unterschreitet die Nenndicke, aber das Maß der zulässigen Regelabweichung wird eingehalten, wohingegen sich für die kleinste gemessene Dicke eine Unterschreitung ergibt. Alle übrigen Meßwerte liegen im Toleranzbereich.

Die Mittelwerte der verzinkten Bleche liegen allesamt unter der Nennblechdicke, allerdings innerhalb der für die Maße zulässigen Regelabweichung. Bei der Blechdicke  $t = 1,50$  mm ergibt sich mit  $t = 1,38$  mm für den unteren statistischen Wert eine unzulässige Regelabweichung. Für die übrigen Dicken wird das zulässige Maß der Regelabweichung eingehalten.

In Tab. 4.4 sind die kunststoffbeschichteten und die emaillierten Bleche auf die Maßhaltigkeit der Nenndicke untersucht. Es wurde versucht, weitestgehend zutreffend die Kernblechdicken zu ermitteln. Hierzu wurden nachfolgende Kombinationen gewählt:

1. Von dem Mittelwert aller gemessenen Gesamtdicken einer Nenndicke wurde die mittlere Beschichtungsdicke der Nenndicke subtrahiert.
2. Vom größten Meßwert der Gesamtdicke wurde der größte Meßwert der Beschichtung abgezogen.
3. Von der kleinsten gemessenen Gesamtdicke wurde die kleinste Beschichtungsdicke abgezogen.

4. Vom oberen 95 % Fraktilewert der Gesamtdicke wurde der obere 95 % Fraktilewert der Beschichtungsdicke subtrahiert.
5. Vom unteren 95 % Fraktilewert der Gesamtdicke wurde der untere 95 % Fraktilewert der Beschichtungsdicke subtrahiert.

Danach ergeben sich für die mit Kunststoff beschichteten Bleche bei den Blechdicken  $t = 1,00$  mm und  $t = 2,50$  mm geringfügige Unterschreitungen der Nennblechdicken für den Mittelwert. Bei  $t = 0,75$  mm entspricht die gemessene Dicke der Nennblechdicke und die übrigen mittleren Dicken liegen über den Nenndicken aber im zulässigen Bereich der Regelabweichung. Auf eine Interpretation der weiteren Lastkombinationen wird hier verzichtet, da sie zwar möglich sind aber nicht als ausreichend abgesichert anzusehen sind.

Bei den emaillierten Blechen entspricht der Mittelwert der Blechdicken dem Nennwert und bei den übrigen Dicken findet eine Abweichung im zulässigen Maße statt.

Zusammenfassend wird festgestellt, daß bei den aluminieren und bei den verzinkten Blechen die Maßabweichungen der Blechdicken sich innerhalb der Toleranzgrenzen bewegen. Allerdings in den häufigsten Fällen innerhalb des Bereiches der unteren zulässigen Regelabweichung.

Die Blechdicken der kunststoffbeschichteten und die der emaillierten Bleche bewegen sich innerhalb des zulässigen Bereiches und hier größtenteils innerhalb der oberen zulässigen Regelabweichung.

#### 4.3 Untersuchung an Materialproben:

##### Zugfestigkeit, Mindeststreckgrenze, Dehnung

Von den aluminieren, den verzinkten, den kunststoffbeschichteten und den emaillierten Blechen wurden für jede Blechdicke jeweils fünf Zugproben angefertigt und hierfür die Werkstoffkennwerte ermittelt.

Die Zugproben wurden bei den kunststoffbeschichteten und emaillierten Blechen aus zusätzlich mitgelieferten Blechen entnommen, wobei die Zugproben und Versuchskörper denselben Blechtafeln entstammen. Bei den aluminieren und verzinkten Blechen wurden die Zugproben nachträglich aus den gezogenen Versuchskörpern entnommen (vgl. Abb.3.1).

An den Flachproben 12,5 x 50 mm nach DIN 50 114 /9/ wurden im Zugversuch nach DIN 50 146 die Werkstoffkennwerte mit einer Universalprüfmaschine HUN 20 der Firma MFL bestimmt. Ermittelt wurden die obere Streckgrenze, die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung der Bleche.

Üblicherweise werden die Zugproben an Flachproben 20 x 80 mm durchgeführt und die Bruchdehnung auf diese Probenlänge bezogen. Wenn der Bruch örtlich und mittig erfolgt, dann ist eine angenäherte Umrechnung der Bruchdehnung von der Probenlänge  $l_0 = 50$  mm auf  $l_0 = 80$  mm möglich.

Werkstoffkennwerte für Bleche sind in DIN 1623 Teil 1, Teil 2 und Teil 3 angegeben /3,4,5/. Die zulässigen Lochleibungsspannungen für Schraub- und Nietverbindungen beziehen sich jedoch auf Baustähle nach DIN 17 100 /6/. Um die hier ermittelten Lochleibungsspannungen mit den in DIN 18 800 Teil 1 angegebenen zulässigen Spannungen vergleichen zu können, erfolgt die Zuordnung der Bleche nach DIN 17 100.

In Tab. 4.5 sind die Werkstoffkennwerte der Vorschriften gegenübergestellt.

Die weichen unlegierten Stähle nach DIN 1623 Teil 1 und Teil 3 weisen eine geringere Zugfestigkeit auf als die allgemeinen Stähle nach DIN 1623 Teil 2 und nach DIN 17 100. Bei den weichen unlegierten Stählen wird die Einhaltung der unteren Streckgrenze gefordert, die teilweise größer ist als die obere Streckgrenze der allgemeinen Stähle. Die Bruchdehnungen der weichen Bleche sind größer als die Bruchdehnungen der Bleche aus den allgemeinen Stählen.

Vorschriften	Stahlsorte		Zugfestigkeit R <sub>m</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Obere Streckgrenze R <sub>eH</sub> (N/mm <sup>2</sup> ) R <sub>p0,2</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Untere Streckgrenze R <sub>eL</sub> (N/mm <sup>2</sup> ) R <sub>p0,2</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Bruchdehnung L <sub>0</sub> =80mm %
	Kürzname	Werkstoffnr.				
DIN 1623 Teil 1 (Feinbleche aus weichen unlegierten Stählen)	St 12	10330	270-410		280	28
	U St 13	10333	270-370		250	32
	RR St 13	10347	270-370		240	34
	St 14	10338	270-350		210	38
DIN 1623 Teil 2 (Feinbleche aus allgemeinen Stählen)	St 37-2	10037	360-510	215		20
	U St 37-2	10036	360-510	215		20
	St 37-3	10116	360-510	215		20
	St 44-3	10144	430-580	245		18
DIN 1623 Teil 3 (weiche unlegierte Bleche zum Emaillieren)	EK 2	10391	270-390		t≤1,5 ; t>1,5 270 ; 270	30
	EK 4	10392	270-350		210 ; 225	38
	ED 3	10393	270-370		250 ; 250	32
	ED 4	10394	270-350		210 ; 225	38
DIN 17100 (Baustähle)	St 37-2	10037	t<3 360-510	t≤16 ; 16>t≤40 235 ; 225		15-26 <sup>1)</sup>
	U St 37-2	10036	360-510	235 ; 225		15-26 <sup>1)</sup>
	R St 37-2	10038	360-510	235 ; 225		15-26 <sup>1)</sup>
	St 37-3	10116	360-510	235 ; 225		15-26 <sup>1)</sup>

Tab. 4.5

1) abhängig von der Walzrichtung und Blechdicke

Gegenüberstellung der Werkstoffkennwerte nach DIN 1623 und DIN 17100

In den Abbildungen 4.5 bis 4.10 sind die Ergebnisse der Zugversuche aufgetragen. Des Weiteren sind die Werkstoffkennwerte für St 37-2 bzw. St 37-3 nach DIN 17 100 angegeben, so daß eine Zuordnung der untersuchten Stähle möglich ist.

Die Ergebnisse der Zugversuche für die mit Aluminium überzogenen Bleche sind in Abb. 4.6 dargestellt. Eine Zuordnung der Bleche nach DIN 17 100 ist möglich, da die Werkstoffkennwerte die Forderungen erfüllen. Bei den verzinkten Blechen (Abb. 4.7) wird die geforderte Zugfestigkeit  $R_m = 360 \text{ N/mm}^2$  für die Blechstärken  $t = 0,75 \text{ mm}$  und  $t = 1,00 \text{ mm}$  unterschritten. Die obere Streckgrenze und die Bruchdehnung werden eingehalten. Die Untersuchungen der kunststoffbeschichteten Bleche (Abb. 4.8) lieferten für die Blechdicken  $t = 1,50 \text{ mm}$  und  $t = 2,00 \text{ mm}$  sehr große Streubreiten der Zugfestigkeit und der Streckgrenze. Einzelne Werkstoffkennwerte liegen unter den Vergleichswerten der DIN 17 100.

Bei der Blechdicke  $t = 2,50 \text{ mm}$  scheint es sich um einen besonders hochwertigen Stahl zu handeln. Hierfür wurde eine 20 % höhere Zugfestigkeit und eine 30 % höhere Streckgrenze ermittelt als bei den übrigen Blechen. Eine geringere Zugfestigkeit und obere Streckgrenze wurden für die emaillierten Bleche gemessen (Abb. 4.9), wohingegen die Bruchdehnung über den Mindestanforderungen vom St 37-2 lag.

In Abb. 4.10 sind die Mittelwerte der Werkstoffkennwerte dargestellt und mit den Werten für St 37-2 nach DIN 17 100 verglichen. Tabellarisch sind die Werte in Tab. 4.6 erfaßt. Neben den Mittelwerten sind ebenfalls die statistisch ermittelten Bemessungswerte nach dem Eurocode Nr. 3 angegeben.

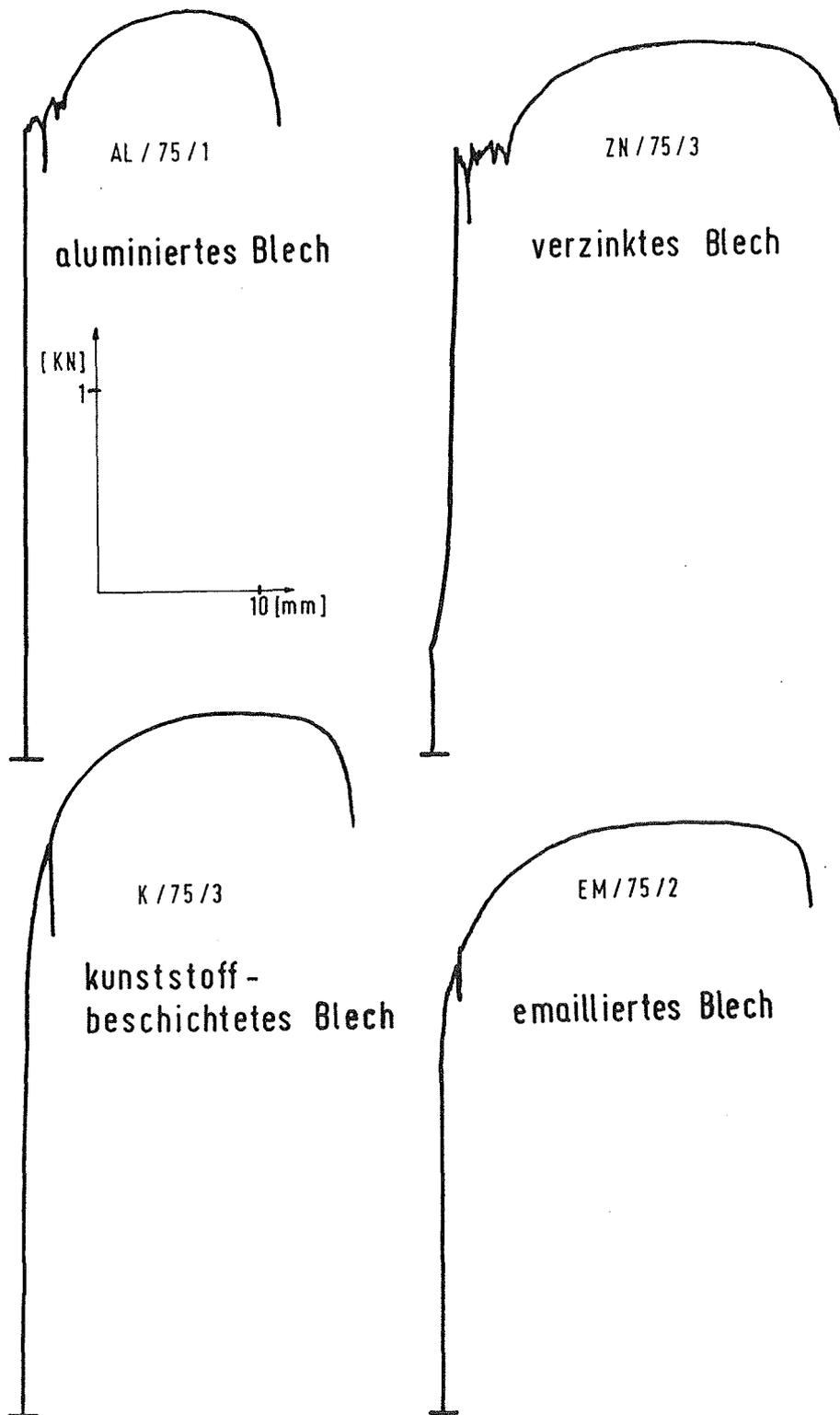


Abb. 4.5

Charakteristische Kraft-Querhauptwegdiagramme  
der Zugproben (Blechdicke  $t = 0,75 \text{ mm}$ )

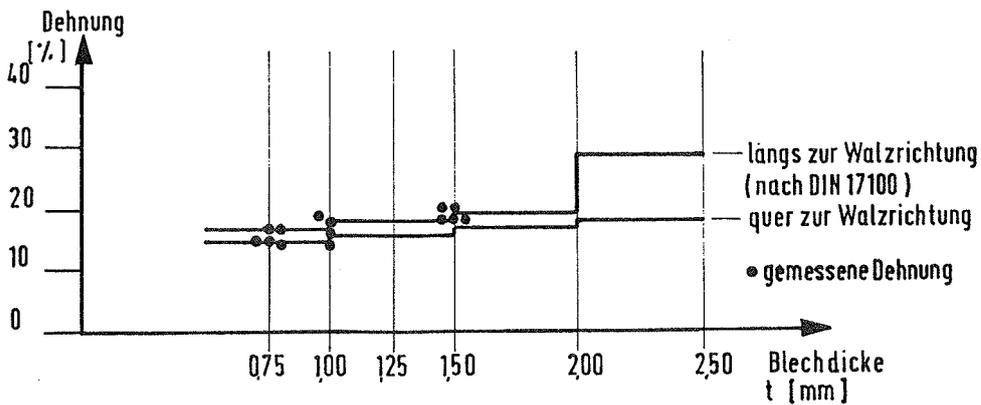
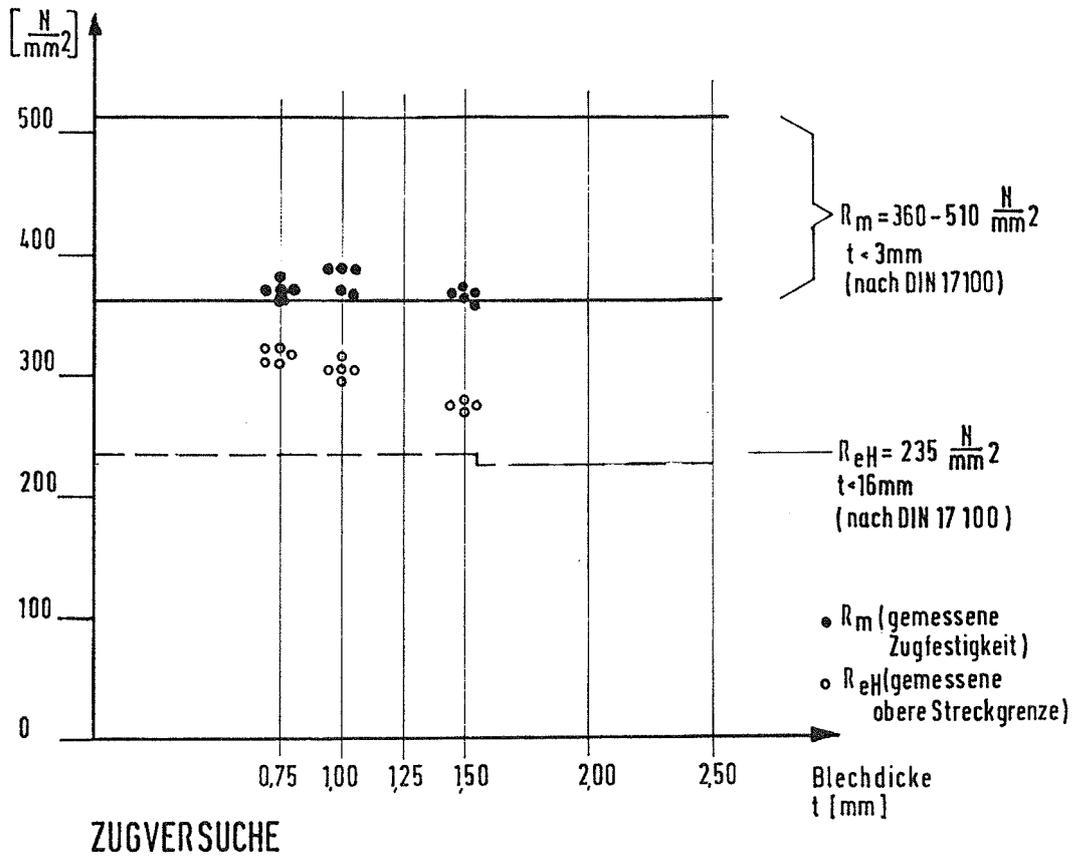


Abb. 4.6

Ergebnisse der durchgeführten Zugversuche der aluminieren Bleche und deren Zuordnung nach DIN 17 100 für St 37-2 und St 37-3.

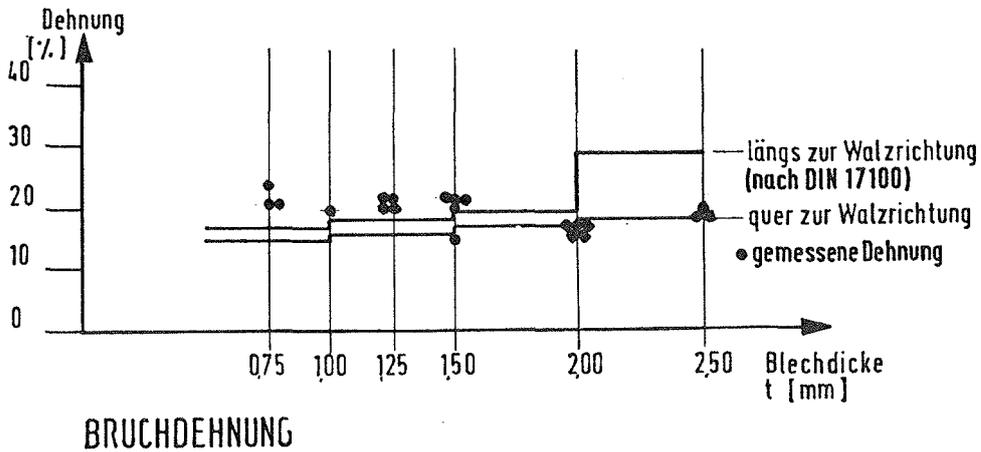
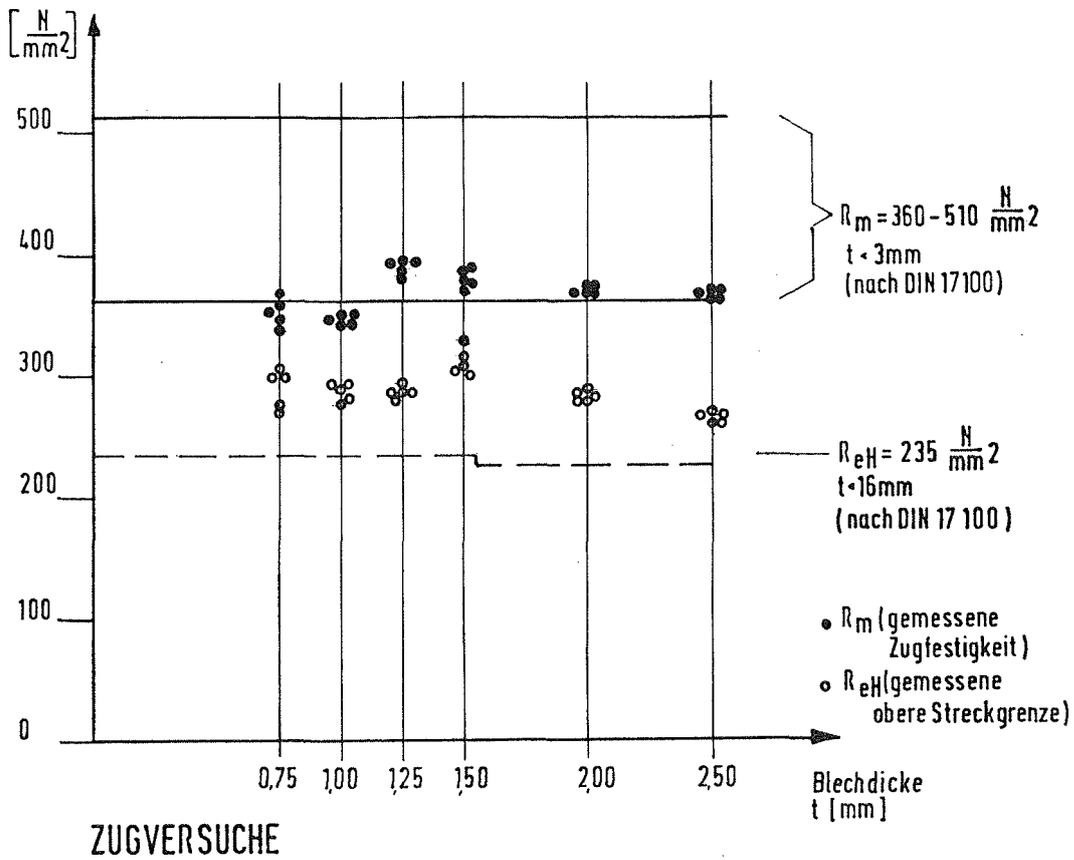


Abb. 4.7

Ergebnisse der durchgeführten Zugversuche der verzinkten Bleche und deren Zuordnung nach DIN 17 100 für St 37-2 und St 37-3.

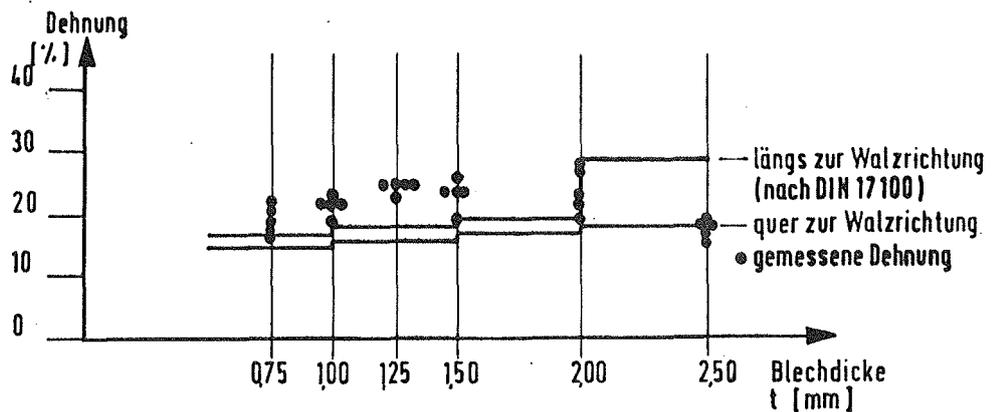
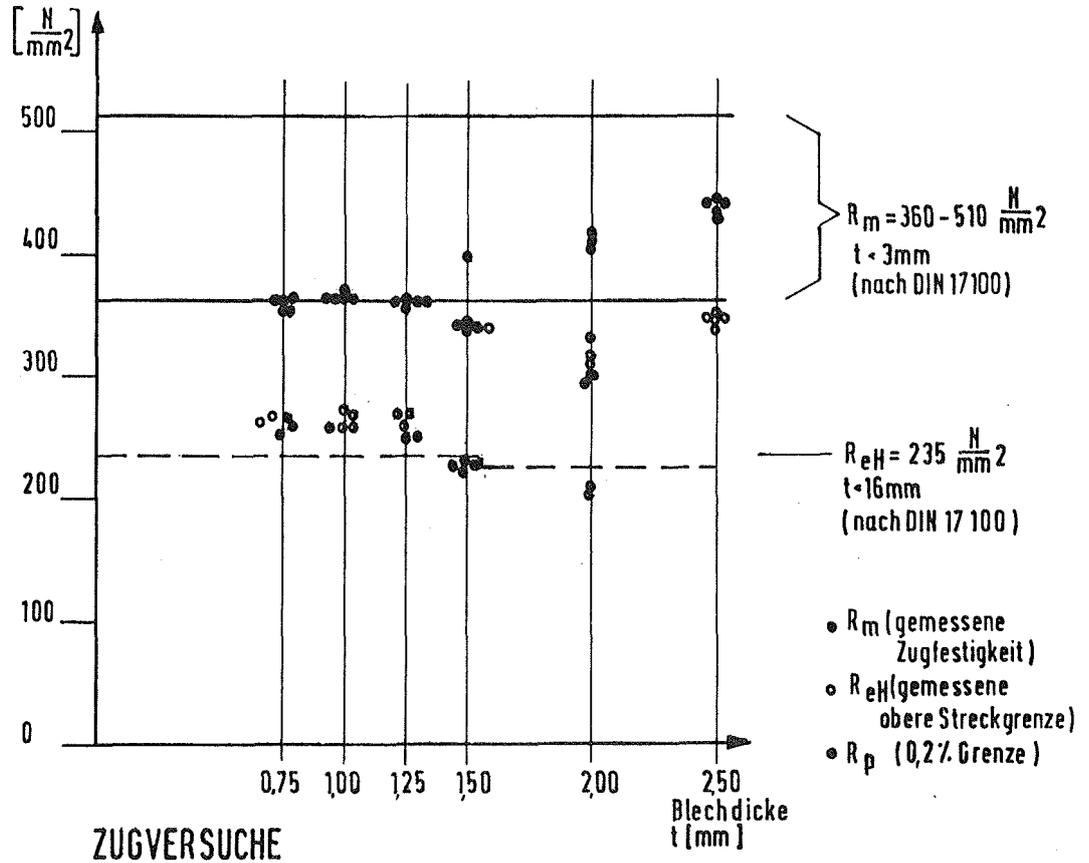


Abb. 4.8

Ergebnisse der durchgeführten Zugversuche der kunststoffbeschichteten Bleche und deren Zuordnung nach DIN 17100 für St 37-2 und St 37-3.

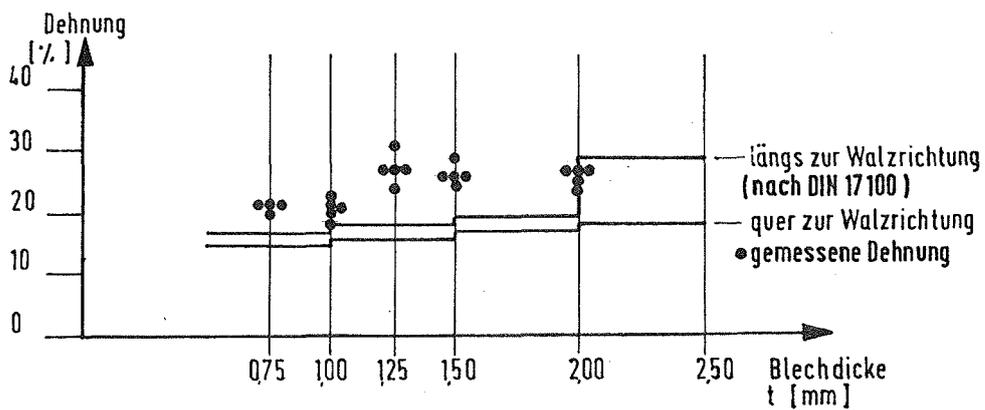
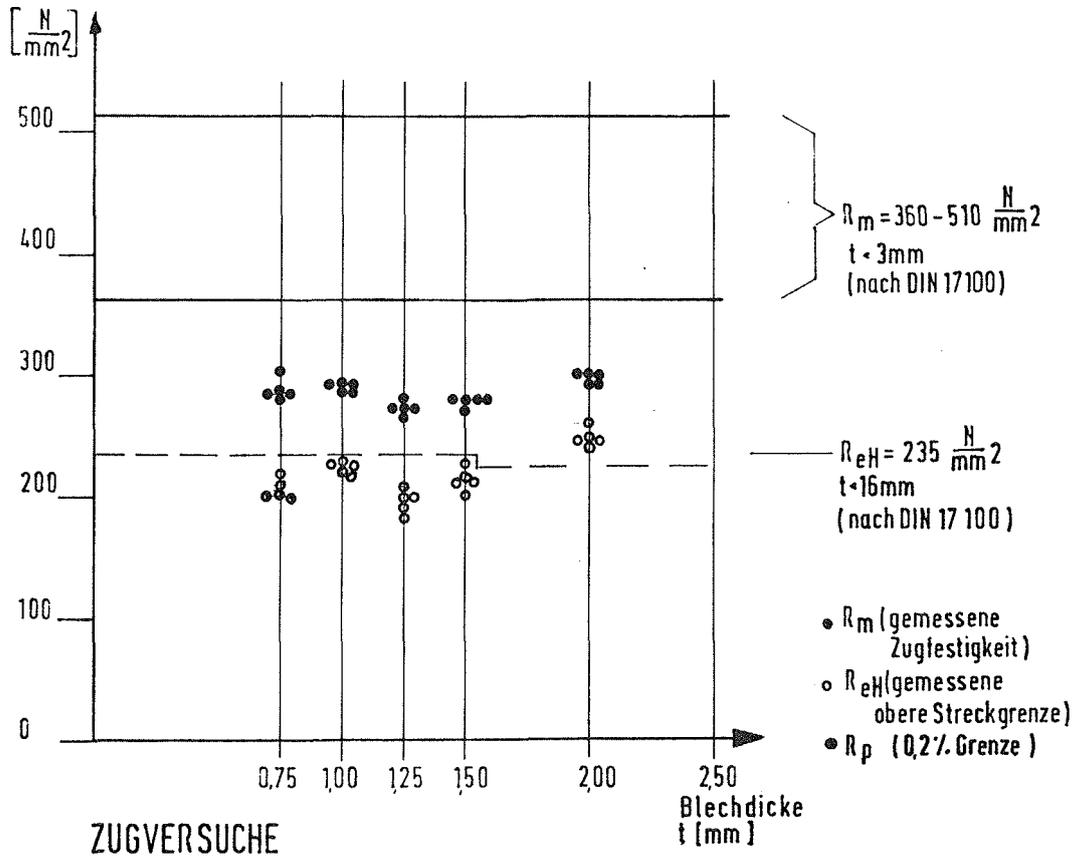


Abb. 4.9

Ergebnisse der durchgeführten Zugversuche der emaillierten Bleche und deren Zuordnung nach DIN 17100 für St 37-2 und St 37-3.

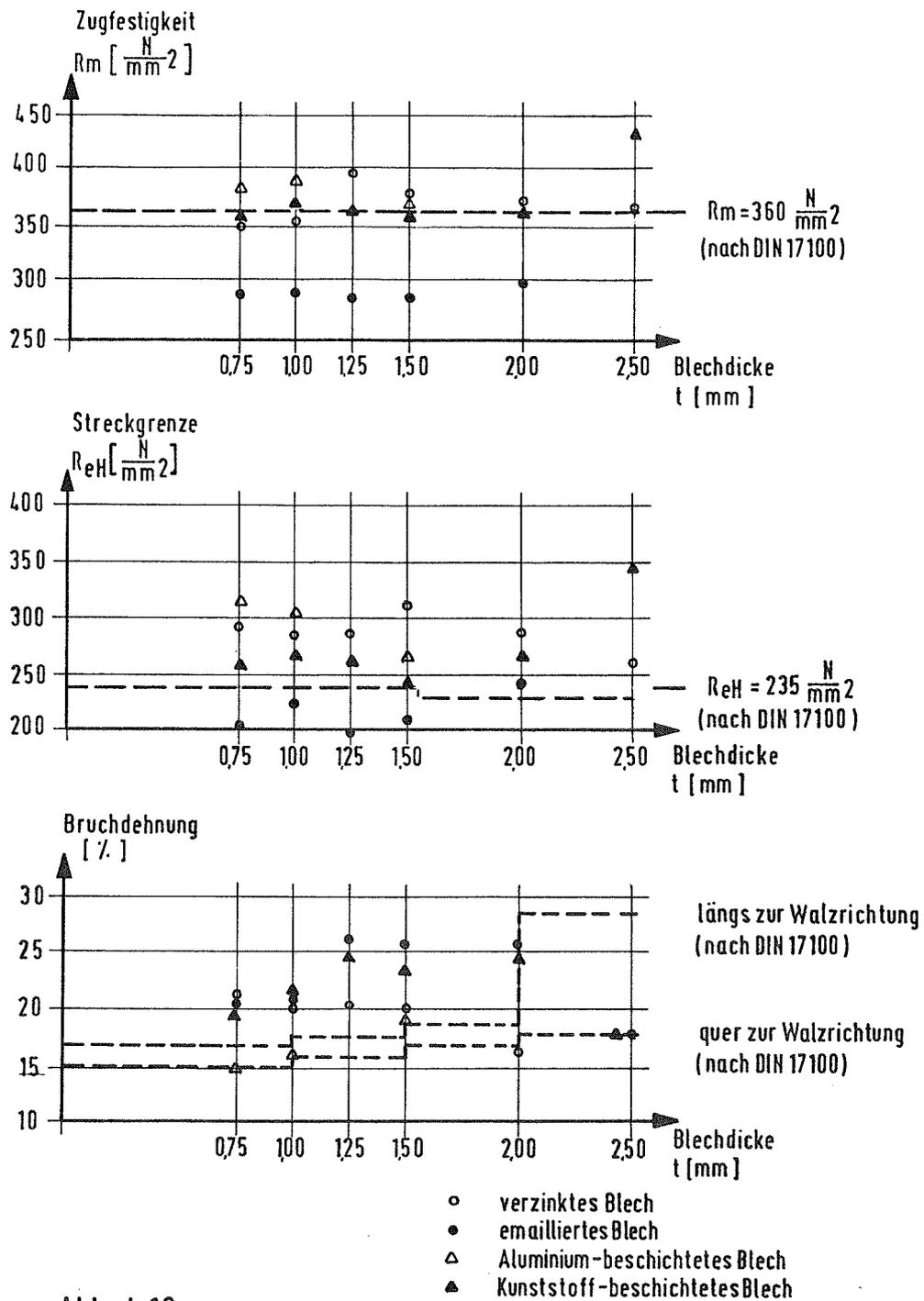


Abb. 4.10

Gemessene mittlere Werkstoffkennwerte der Zugproben und deren Zuordnung nach DIN 17100 für St 37-2 (Mittelwerte aus 5 Proben)

#### 4.4 Verhalten der Zugproben bei langsam aufgebrachtter Last

Die mit der Universalprüfmaschine HUN 20 der Firma MFL durchgeführten Zugversuche wurden weggesteuert (Querhauptweg) gefahren. In Abb. 4.5 ist für die Blechdicke  $t = 0,75$  mm jeweils ein charakteristisches Kraft-Querhauptweg-Diagramm aus /11,12/ aufgetragen. Bei Erreichen der Streckgrenze wurde die Verschiebung angehalten und der zurückgelegte Verformungsweg vorgehalten. Dabei verringerte sich die Kraft. Nach einer Zeitdauer von 3 bis 4 Minuten kam der Relaxationsvorgang zum Stillstand. Anschließend wurde die Verschiebung wieder angefahren, bis die Tragfähigkeit der Zugprobe erschöpft war.

Aus dem Kraft-Querhauptweg-Diagramm wurde der Lastabfall herausgemessen und auf die Streckgrenze bezogen. Somit wurde ein Abminderungsfaktor erhalten, mit dem die Zugfestigkeit und die Mindeststreckgrenze bei zügiger Kraftaufbringung zu reduzieren sind, wenn diese Werte für die Beanspruchung bei dauerhaft ertragener Last übernommen werden sollen.

In Tab. 4.6 sind die Mittelwerte und die statistisch ermittelten Bemessungswerte der Abminderungsfaktoren angegeben, mit denen die Zugfestigkeit und obere Streckgrenze zu multiplizieren sind, wenn die Lastaufbringung langsam erfolgt oder die Last ständig vorhanden ist.

Blech	t (mm)	Zugfestigkeit		obere Streckgr.		Bruchdehnung		Abminderungs-	
		$R_m$ (N/mm <sup>2</sup> )		$R_{eH}$ (N/mm <sup>2</sup> )		%		faktor	
		MW	St.W	MW	St.W	MW	St.W	MW	St.W
AL	0,75	373	365	320	315	15	14	0,90	0,89
	1,00	383	371	306	295	16	14	0,88	0,86
	1,50	363	358	274	268	19	18	0,90	0,88
ZN	0,75	354	341	295	279	22	20	0,88	0,86
	1,00	351	348	287	278	20	20	0,86	0,85
	1,25	393	389	289	285	21	20	0,87	0,85
	1,50	378	366	316	302	20	17	0,90	0,89
	2,00	375	374	286	282	17	16	0,91	0,90
	2,50	364	361	266	261	18	17	0,89	0,87
K	0,75	358	352	260	254	19	17	0,87	0,82
	1,00	367	364	267	263	22	20	0,90	0,86
	1,25	360	357	260	250	25	24	0,87	0,85
	1,50	355	325	248	198	23	20	0,91	0,88
	2,00	366	314	272	223	24	20	0,90	0,87
	2,50	438	431	349	345	18	16	0,93	0,92
EM	0,75	288	278	205	195	21	20	0,87	0,84
	1,00	290	287	225	220	21	19	0,89	0,87
	1,25	278	275	197	186	27	24	0,86	0,83
	1,50	277	274	215	202	26	24	0,83	0,82
	2,00	297	294	248	240	26	24	0,85	0,84

MW = arithmetisches Mittel

St.W = Statistischer Bemessungswert nach Eurocode Nr. 3 /1/

Tab. 4.6

Werkstoffkennwerte und der Abminderungsfaktor bei dauerhaft ertragener Last.

Der kleinste Mittelwert der Abminderungsfaktoren wurde bei den emaillierten Blechen bei einer Blechdicke  $t = 1,50$  mm gemessen und betrug  $a_D = 0,83$ . Der größte Wert wurde für das mit Kunststoff beschichtete Blech  $t = 2,50$  mm gemessen und betrug im Mittel  $a_D = 0,93$ , wobei anzumerken ist, daß für diese Blechdicke besonders hohe Zugfestigkeiten und Streckgrenzenfestigkeiten ermittelt wurden, vgl. Abs. 4.3. Vereinfachend und für die weitere Bemessung auf der sicheren Seite liegend wurde davon ausgegangen, daß der Abminderungsfaktor sich proportional zur Kraft verhält. Es wurde also für die Zugfestigkeit und für die obere Streckgrenze mit dem gleichen Abminderungsfaktor gerechnet.

## 5.0 Zugversuche der Prüfkörper und deren Auswertung

### 5.1 Versuchsdurchführung

Die Zugversuche an den insgesamt 534 Prüfkörpern wurden mit einer Universalprüfmaschine HUN 100 der Firma MFL durchgeführt. Das Gerät verfügt über hydraulische Einspannbacken und wird weg-geregelt (Querhauptweg) gesteuert. Bei Blechdicken  $t < 2,0$  mm betrug die Geschwindigkeit  $v_1 = 0,0833$  mm/sec. Bei der Blechdicke  $t = 2,5$  mm wurden die Versuche mit der geringeren Geschwindigkeit  $v_2 = 0,04166$  mm/sec. durchgeführt.

Auf einem x-y-Schreiber wurden die Zugkraft und der Querhauptweg registriert.

In Abb. 5.1 sind charakteristische Kraft-Querhauptwegdiagramme aus /11/ aufgetragen. Die Versuchskörper wurden nach folgendem Schema bezeichnet:

Oberflächenbeschichtung der Bleche / Blechdicke in mm x 100 / Schraubengröße / Vorspanngrad der Schrauben in %// lfd. Nr. des Versuchskörpers. Somit ergeben sich Parameterkombinationen, wie z. B.: AL/150/M10/50//2.

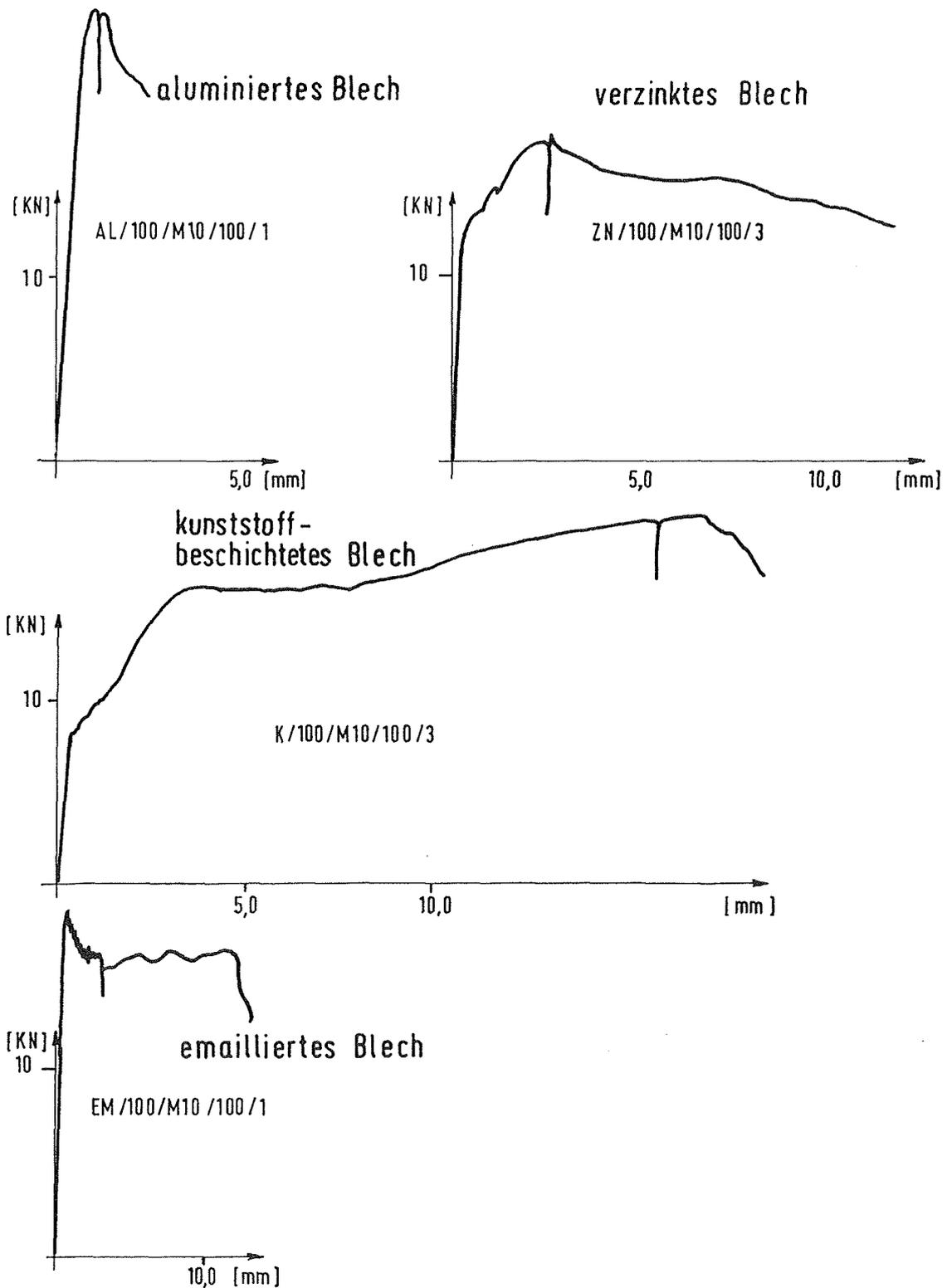


Abb. 5.1

Charakteristische Kraft-Querhauptwegdiagramme  
der Zugversuche (Blechdicke  $t=1,00\text{mm}$ , Schraube M10, volle Vorspannung)

In der Regel wurde die Querhauptverschiebung bei jedem Versuch im Bereich der Fließgrenze so lange konstant gehalten, bis der Zugkraftabfall abgeklungen war. Dieser Vorgang dauerte mindestens 5 Minuten. Anschließend wurde der Versuch über die Traglast hinaus bis zu einem deutlichen Abfall der Last fortgeführt.

Das Versagen der Schraubverbindungen wurde bei fast allen Versuchskörpern durch ein Herauskröpfen der Schrauben aus den Blechen hervorgerufen. Dabei lief der Versagensmechanismus folgendermaßen ab:

Zu Versuchsbeginn, nach dem Einspannen des Versuchskörpers in die Einspannbacken der Presse, lagen die Schwerlinien der beiden Bleche auf verschiedenen Wirkungslinien. Bei Aufbringen der Zugkraft verformten sich die Bleche im Bereich der Schrauben soweit, bis sich eine gemeinsame Wirkungslinie einstellte. Gleichzeitig stellten sich die in ihrer Ausgangslage rechtwinklig zu den Blechen angeordneten Schrauben schräg.

Das Versagen des Probekörpers wurde dadurch bewirkt, daß die Schraubenmuttern oder die Schraubenköpfe aus den Blechen herauskröpften. Es traten große plastische Verformungen der Bleche und der Scheiben auf, die sich dabei an den Kopf oder die Mutter der Schraube anschmiegten.

Nur wenige Schrauben versagten durch Abscheren. Die Traglast  $F_T$  wurde notiert. Bei den emaillierten Blechen wurde ebenfalls die Last  $F_A$  festgehalten, bei der die Emaille im Bereich der Schrauben absplitterte. Des weiteren wurde die Last  $F_K$  notiert, bei der die beiden Bleche deutlich sichtbar auseinanderklafften.

Bei den aluminieren, den verzinkten und den kunststoffbeschichteten Blechen wurde dieser Vorgang nicht gemessen.

## 5.2 Versuchsauswertung

In Abb. 5.2 ist das Kraft-Querhauptweg-Diagramm für einen Versuchskörper aus kunststoffbeschichtetem Blech  $t = 1,25$  mm dargestellt. Die Bleche sind mit Schrauben M 12, ohne Vorspannung, miteinander verbunden. Zu der notierten Traglast, die ebenfalls aus dem Diagramm herausgemessen werden kann, wurde der dazugehörige Verschiebungsweg  $f_T$  herausgemessen. Für die Verschiebungswege  $f_{10}$  (10 mm) und  $f_5$  (5 mm) wurden die dazugehörigen Kräfte  $F_{10}$  und  $F_5$  ermittelt.

Bei den emaillierten Versuchskörpern wurden zusätzlich die Verschiebungswege  $f_A$  ermittelt, bei der die Emaile abplatzt und es wurde der Weg gemessen, bei der sich die Fuge  $f_K$  zwischen den beiden Blechen deutlich sichtbar öffnete.

Des weiteren wurde der Lastfall herausgemessen, der sich bei angehaltener Querhauptverschiebung ergab. Er wurde auf die dazugehörige aufgebrachte Last bezogen. Somit konnte ein Abminderungsfaktor  $a_D$  ermittelt werden, mit dem die zügig aufgebrachte Kraft zu multiplizieren ist, um die Bedingungen einer Dauerlast bzw. einer langsam aufgebrachten Kraft zu erhalten. Näherungsweise wurde davon ausgegangen, daß der Abminderungsfaktor sich proportional zur Kraft verhält.

Die Lochleibungsspannung  $\sigma_1$  in einem Bauteil und in einer Schraube errechnet sich zu:

$$\sigma_1 = \frac{F}{n \cdot t_v \cdot d_s} \quad (\text{N/mm}^2)$$

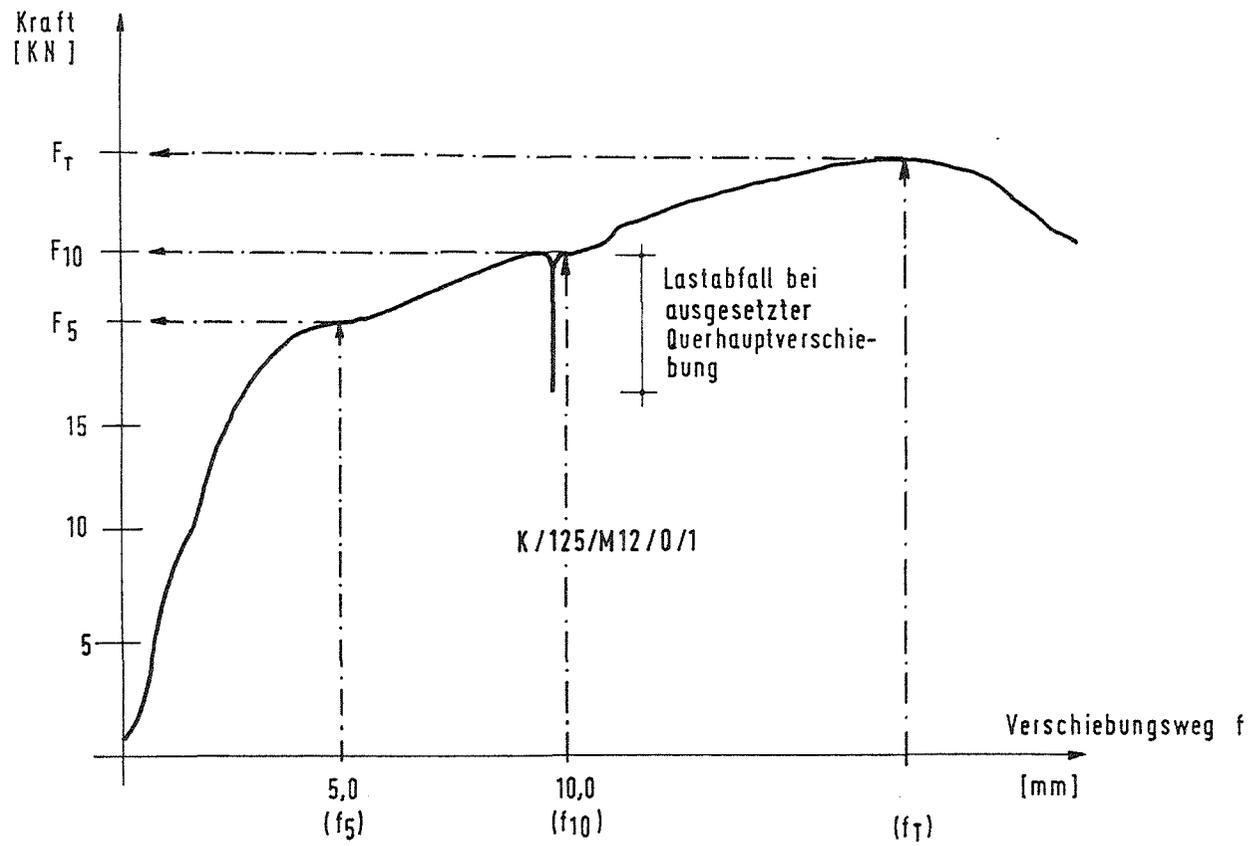


Abb. 5.2  
Auswertung der Versuchsergebnisse

Um die gemessenen Lasten auf den Stahl St 37-2 beziehen zu können, den Einfluß in der Abweichung der Blechdicke auszuschalten und die Auswirkung der ständig einwirkenden Last zu berücksichtigen, wurde die gemessene Kraft wie folgt umgerechnet:

$$F = \bar{F} \cdot \frac{t}{t_V} \cdot \frac{R}{R_{mV}} \cdot a_D \quad (N)$$

- $\sigma_1$  (N/mm<sup>2</sup>) = Lochleibungsspannung
- $F$  ( N ) = Kraft
- $\bar{F}$  ( N ) = gemessene Kraft
- $n$  ( - ) = Anzahl der Schrauben
- $t_N$  ( mm ) = Nennblechdicke
- $t_V$  ( mm ) = Blechdicke der Prüfkörper
- $d_s$  ( mm ) = Schraubendurchmesser
- $R_{mN}$  (N/mm<sup>2</sup>) = garantierte Mindestzugfestigkeit des St37-2
- $R_{mV}$  (N/mm<sup>2</sup>) = Mindestzugfestigkeit der Prüfkörper
- $a_D$  ( - ) = Abminderungsfaktor für die dauerhaft ertragene Belastung gegenüber dem bei zügiger Belastung gemessenen Wert

Die Zugkraft  $\bar{F}$  konnte unmittelbar aus den Kraft-Querhauptweg-Diagrammen herausgegriffen werden, bzw. war während der Versuchsdurchführung zahlenmäßig protokolliert, so daß sie nur übernommen zu werden brauchte.

Als Blechdicke  $t_V$  der aluminieren und der verzinkten Prüfkörper wurde der Mittelwert aus den Meßergebnissen beider Bleche eingesetzt. Die Blechdicke  $t_V$  der kunststoffbeschichteten und emaillierten Prüfkörper ergab sich, indem die gemittelte Gesamtdicke der beiden Bleche um die zweifache mittlere Beschichtungsdicke der jeweiligen Nennblechdicke reduziert wurde (hierzu vgl. Abs. 4.1 und 4.2).

Für die Mindestzugfestigkeit  $R_{mV}$  der Prüfkörper wurde der Mittelwert aus 5 Werkstoffuntersuchungen der jeweiligen Nennblechdicke eingesetzt. Die Ergebnisse sind in Abschnitt 4.3 dargestellt. Der Abminderungsfaktor  $a_D$  wurde für jeden Zugversuch ermittelt und unmittelbar in die obere Gleichung eingesetzt.

### 5.3 Abminderungsfaktor $a_D$ bei Dauerlast

Die Abminderungsfaktoren, mit denen die bei zügiger Lastaufbringung ermittelten Traglasten zu multiplizieren sind, um die Traglasten zu erhalten, die auf dauerhafte Beanspruchungen angewendet werden können, werden durch lastabhängige und materialabhängige Größen beeinflusst. Als lastabhängige Größen sind die Belastungsgeschwindigkeit, die Belastungsart (Erstbelastung oder Wiederbelastung), die Lastspielzahl und die Lastaufbringung zu verstehen. Die materialabhängigen Größen sind Blechgüte, Blechdicke, Schraubengüte, Schraubendurchmesser und sowohl die Tragweise der Schrauben als auch diejenige der Blechprobe.

In den Abb. 5.3 bis 5.6 sind die aus drei Versuchen gemittelten Werte der Abminderungsfaktoren, getrennt nach Oberflächenbeschichtung, Blechdicke, Schraubendurchmesser und Vorspanngrad aufgetragen.

Allgemein fällt es schwer, Abhängigkeiten festzustellen. Der Einfluß der Blechgüte wirkt sich beim aluminieren Blech am ungünstigsten aus. Als mittlerer Abminderungsfaktor aller Messungen wurde hierfür  $a_D = 0,81$  ermittelt, während sich für die drei übrigen Blechgüten jeweils der etwas günstigere Wert von  $a_D = 0,84$  ergab. Weitere Ergebnisse der statistischen Auswertung sind Tab. 5.1 zu entnehmen.

	Blech	Mittelwert	95 % Fraktile	
			unterer Wert	oberer Wert
Versuchskörper (n = 81 - 162)	AL	0,81	0,71	0,91
	ZN	0,84	0,74	0,94
	K	0,84	0,74	0,94
	EM	0,84	0,76	0,92
Zugproben (n = 15 - 30)	AL	0,90	0,87	0,93
	ZN	0,88	0,84	0,92
	K	0,90	0,85	0,95
	EM	0,86	0,81	0,91

Tab. 5.1

Abminderungsfaktoren  $a_D$

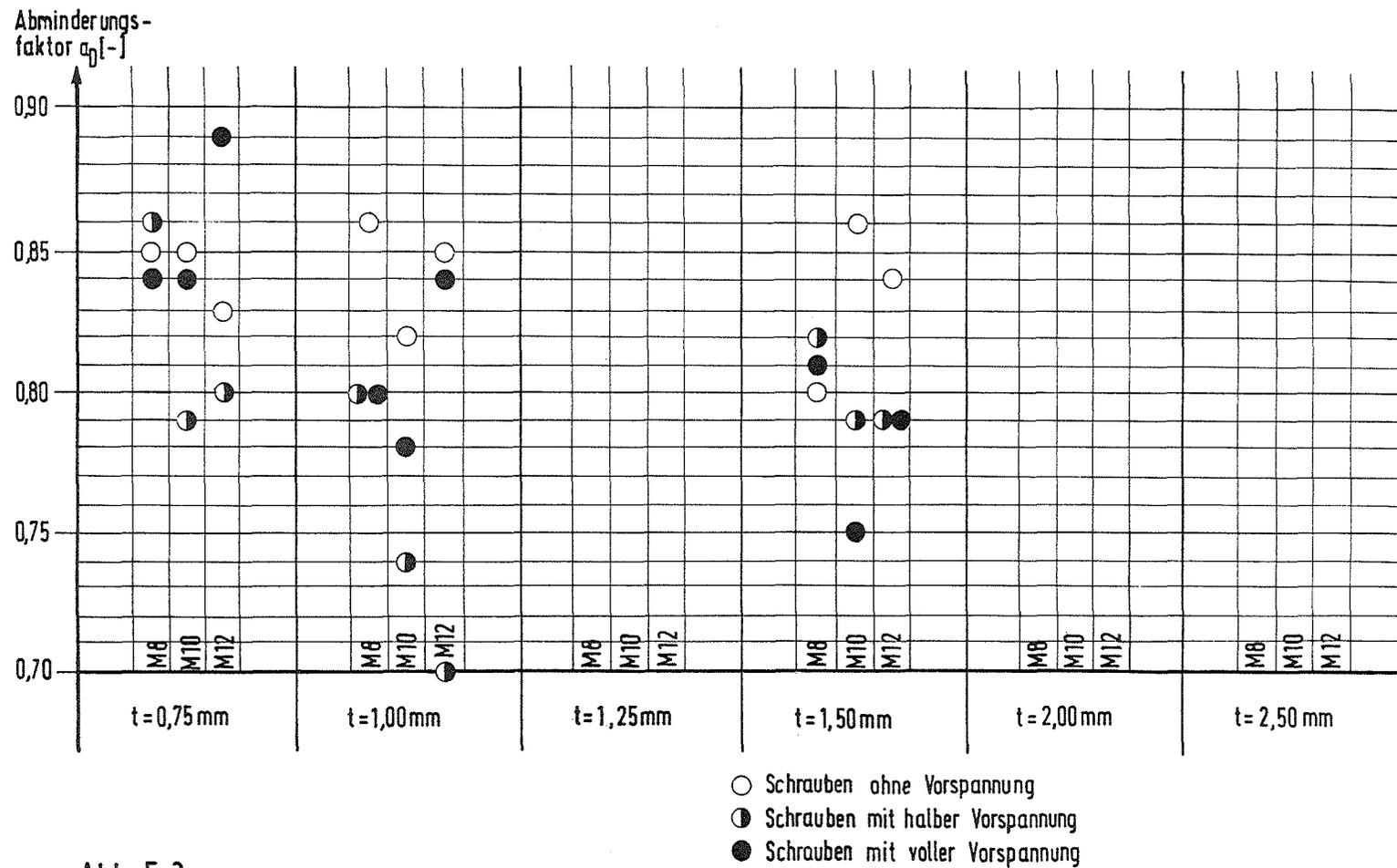


Abb. 5.3  
 Abminderungsfaktor für die dauerhaft ertragene Belastung gegenüber dem bei zügiger Belastung gemessenen Wert der aluminieren Bleche

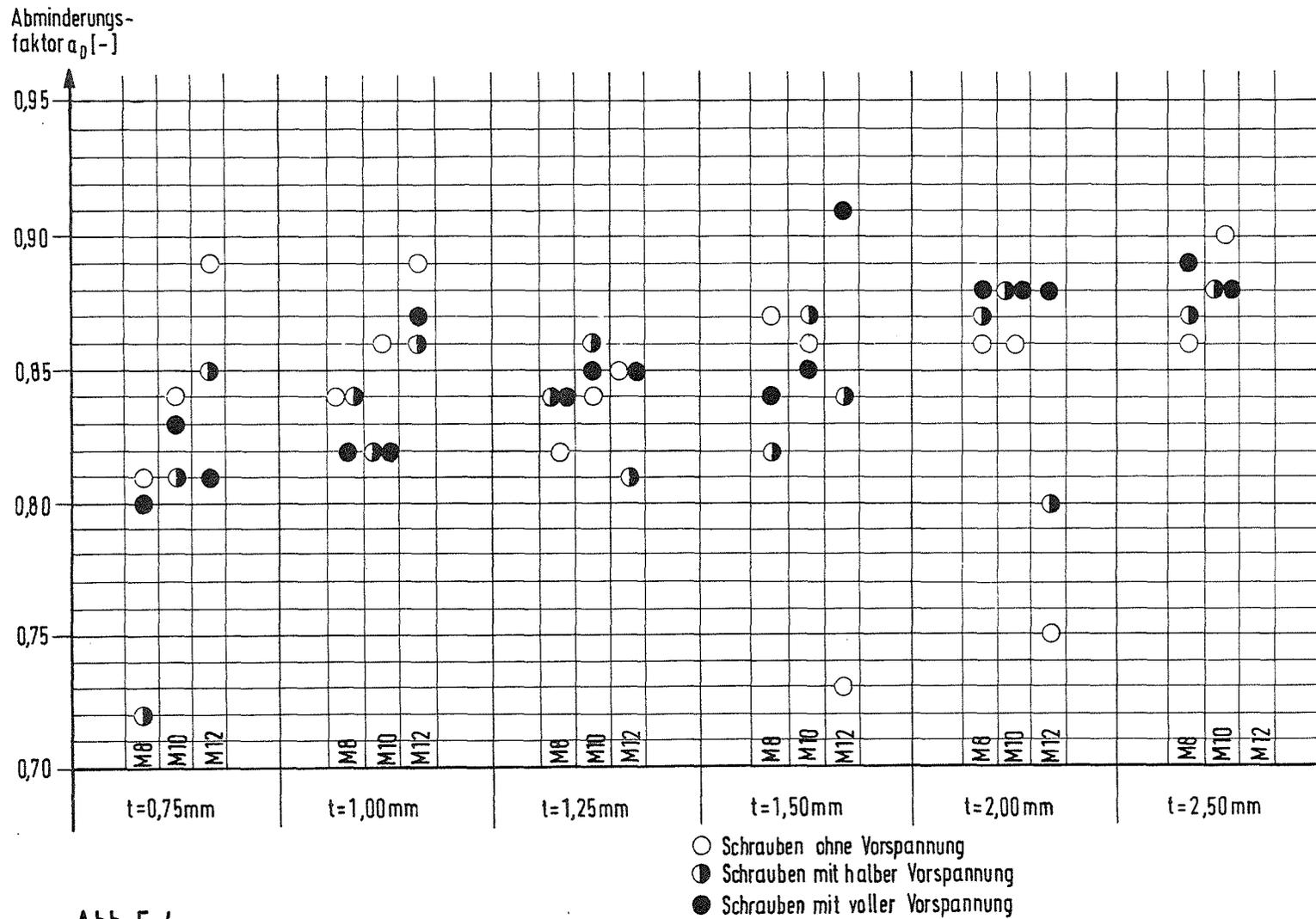


Abb. 5.4  
 Abminderungsfaktor für die dauerhaft ertragene Belastung gegenüber dem bei zügiger Belastung gemessenen Wert der verzinkten Bleche

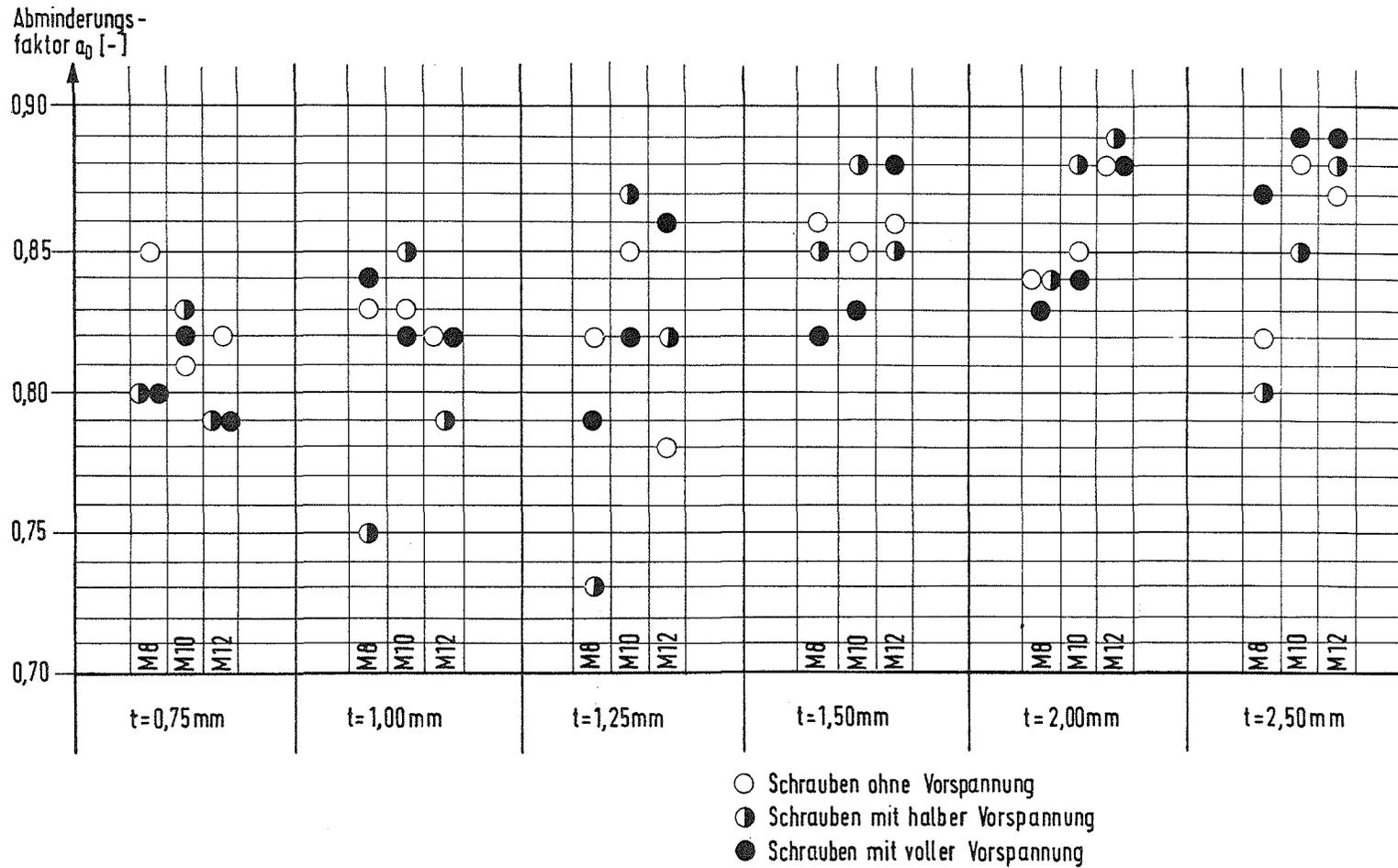


Abb. 5.5  
 Abminderungsfaktor für die dauerhaft ertragene Belastung gegenüber dem bei zügiger Belastung gemessenen Wert der kunststoffbeschichteten Bleche

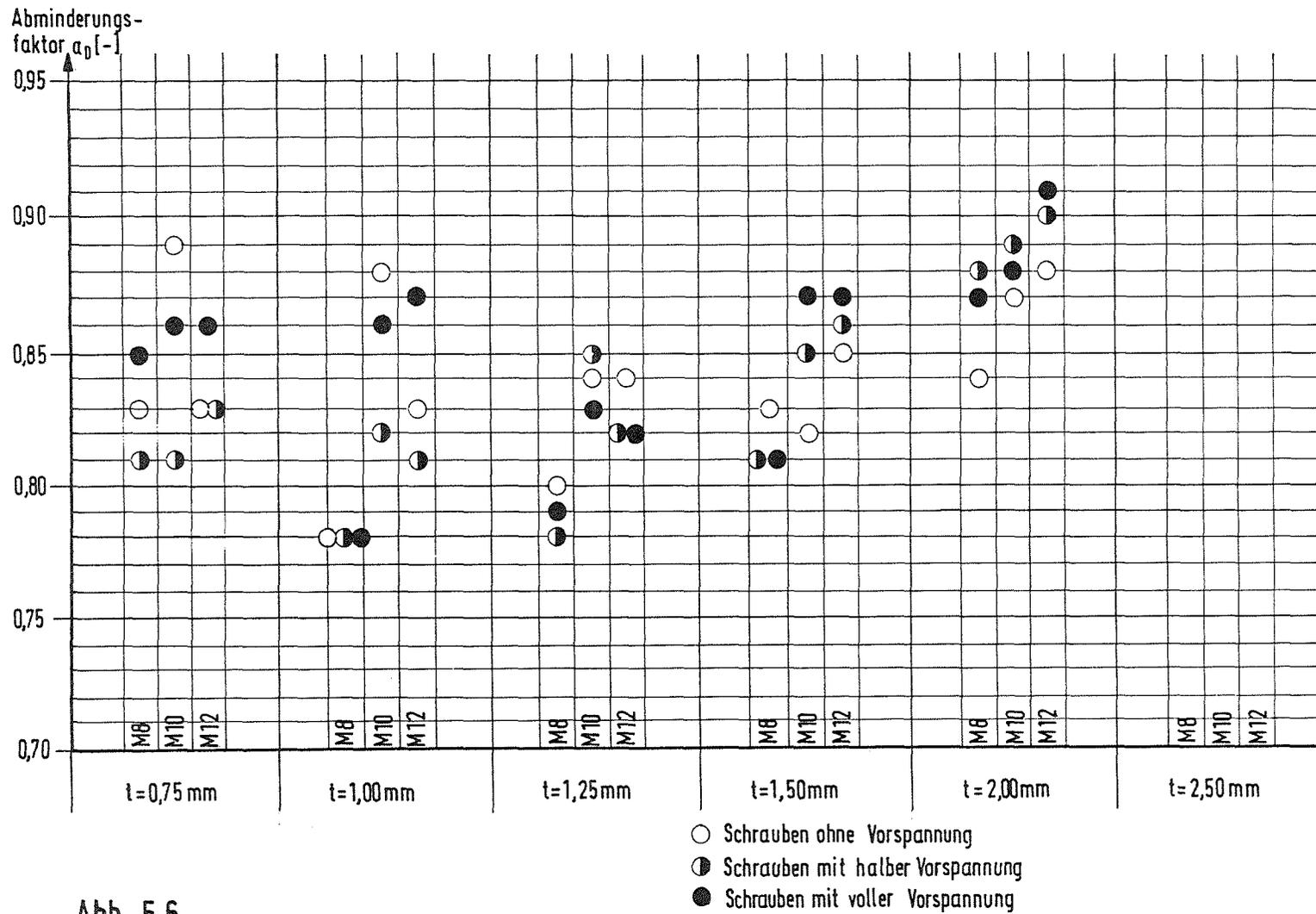
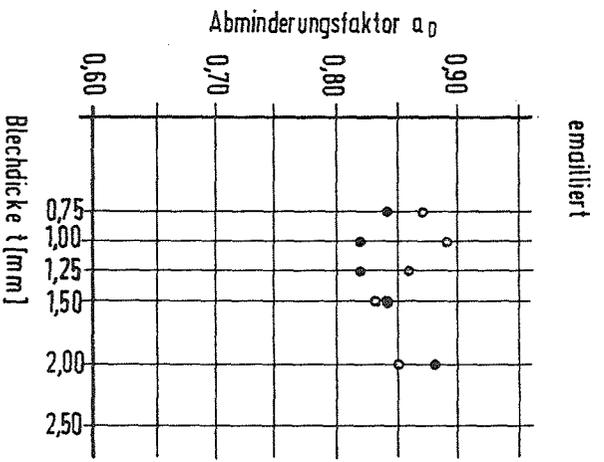
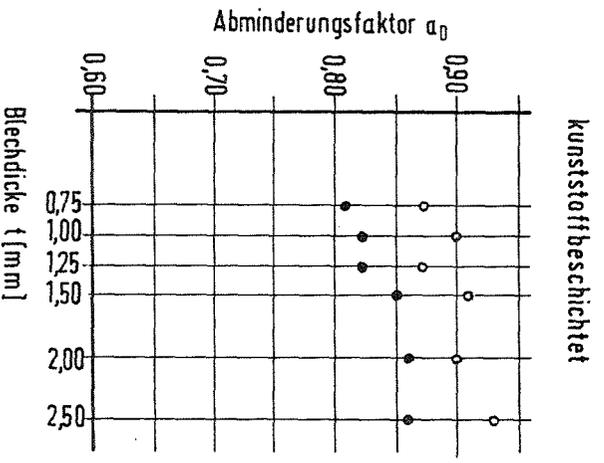
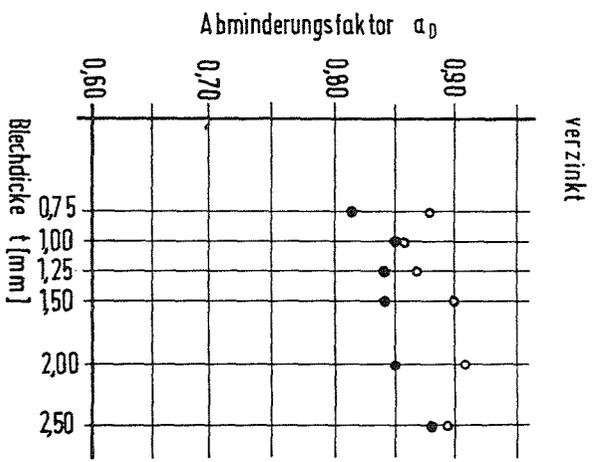
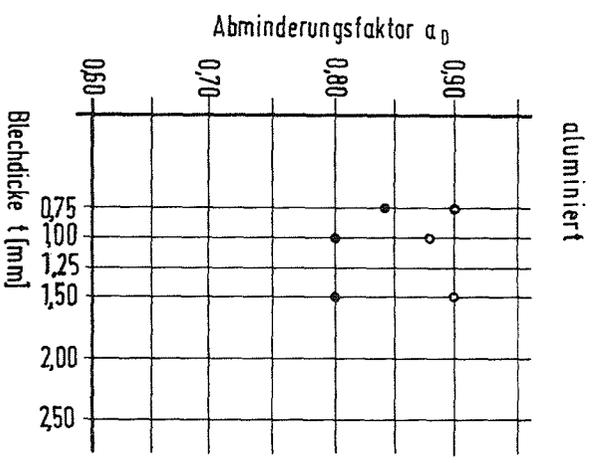


Abb. 5.6  
 Abminderungsfaktor für die dauerhaft ertragene Belastung gegenüber dem bei zügiger Belastung gemessenen Wert der emaillierten Bleche



- Mittelwerte der Werkstoffproben (n=5)
- Mittelwerte der Schraubverbindungen (n=27)

**Abb. 5.7**  
Gegenüberstellung der Abminderungsfaktoren bei dauerhaft er-  
tragener Last für die Zugversuche der Werkstoffprobe und  
für die Traglastversuche der Schraubverbindungen

Für die verzinkten und emaillierten Bleche sowie für die kunststoffbeschichteten Bleche werden die Abminderungsfaktoren mit zunehmender Blechdicke günstiger, d. h. die Traglasten der dickeren Bleche nehmen für die dauerhaft ertragene Belastung überproportional zur Blechdicke zu.

Die emaillierten Bleche und die kunststoffbeschichteten Bleche (Abb. 5.5 und Abb. 5.6) liefern für den Schraubendurchmesser M 8 die ungünstigsten Abminderungsfaktoren. Der Faktor für die Schrauben M 10 und M 12 ist annähernd gleich. Für die verzinkten Bleche (Abb. 5.4) ergeben sich für die Schraube M 8 bei den Blechdicken  $t = 0,75 \text{ mm}$ ,  $1,00 \text{ mm}$  und  $1,25 \text{ mm}$  ungünstigere Abminderungen als für die Schrauben M 10 und M 12. Bei den Blechdicken  $t = 1,5 \text{ mm}$ ,  $2,0 \text{ mm}$  und  $t = 2,5 \text{ mm}$  ergeben sich annähernd gleich große Faktoren.

Die aluminieren Bleche (Abb. 5.3) lassen aufgrund von nur drei untersuchten Blechdicken keine Interpretation der Ergebnisse zu. Eine Aussage über den Einfluß der Vorspannung zu treffen ist nicht möglich. Hier ist kein Zusammenhang erkennbar.

In Abb. 5.7 sind die gemittelten Abminderungsfaktoren der Zugproben denen der Versuchskörper gegenübergestellt. Allgemein kann festgestellt werden, daß die Abminderungsfaktoren der Versuchskörper ungünstiger sind, hierzu vgl. auch Tab. 5.1. Jedoch ergeben sich zum Teil annähernd gleiche Abminderungsfaktoren und für die Blechdicken  $t = 1,5 \text{ mm}$  und  $t = 2,0 \text{ mm}$  wurden für die emaillierten Bleche sogar größere Faktoren gemessen.

## **5.4 Lochleibungsspannungen bei Erreichen der Tragfähigkeit**

### **5.4.1 Tragfähigkeit bei zügig aufgebrachtter Last**

Die Mittelwerte der Meßergebnisse von drei Versuchsergebnissen sind für AL-Bleche in Abb. 5.8 dargestellt, für ZN in Abb. 5.9, für K in Abb. 5.10 und für EM-Bleche in Abb. 5.11.

Bei der Auswertung und Darstellung wurde unterschieden nach der Nennblechdicke, dem Schraubendurchmesser und dem Vorspanngrad der Schrauben. Aus den Abbildungen ist ablesbar, daß mit Ausnahme der emaillierten Bleche mit zunehmender Blechdicke die Tragfähigkeit (Lochleibungsspannung) ansteigt.

Am stärksten wird der Einfluß der Vorspannung bei den Blechdicken  $t = 0,75$  mm und  $t = 1,00$  mm erkennbar. Die überhaupt größten Lochleibungsspannungen wurden für die kunststoffbeschichteten Versuchskörper mit der Blechdicke  $t = 2,5$  mm gemessen. Hier handelt es sich aber um einen höherwertigen Stahl, wie unter 4.3 festgestellt wurde.

### **5.4.2 Tragfähigkeit bei langsam aufgebrachtter Last (Dauerlast)**

Die mit dem Abminderungsfaktor  $a_D$  multiplizierten Lochleibungsspannungen der zügig aufgebrachten Belastung sind für AL-Bleche, für ZN, für K und für die EM-Bleche in den Abbildungen 5.12 bis 5.15 aufgetragen. Das unter Abs. 5.4.1 Gesagte trifft auch hierfür zu. Der Abminderungsfaktor reduziert die gemittelten Lochleibungsspannungen annähernd proportional, so daß bei der langsam aufgebrachten Last keine wesentlichen Veränderungen im Tragverhalten erkennbar sind.

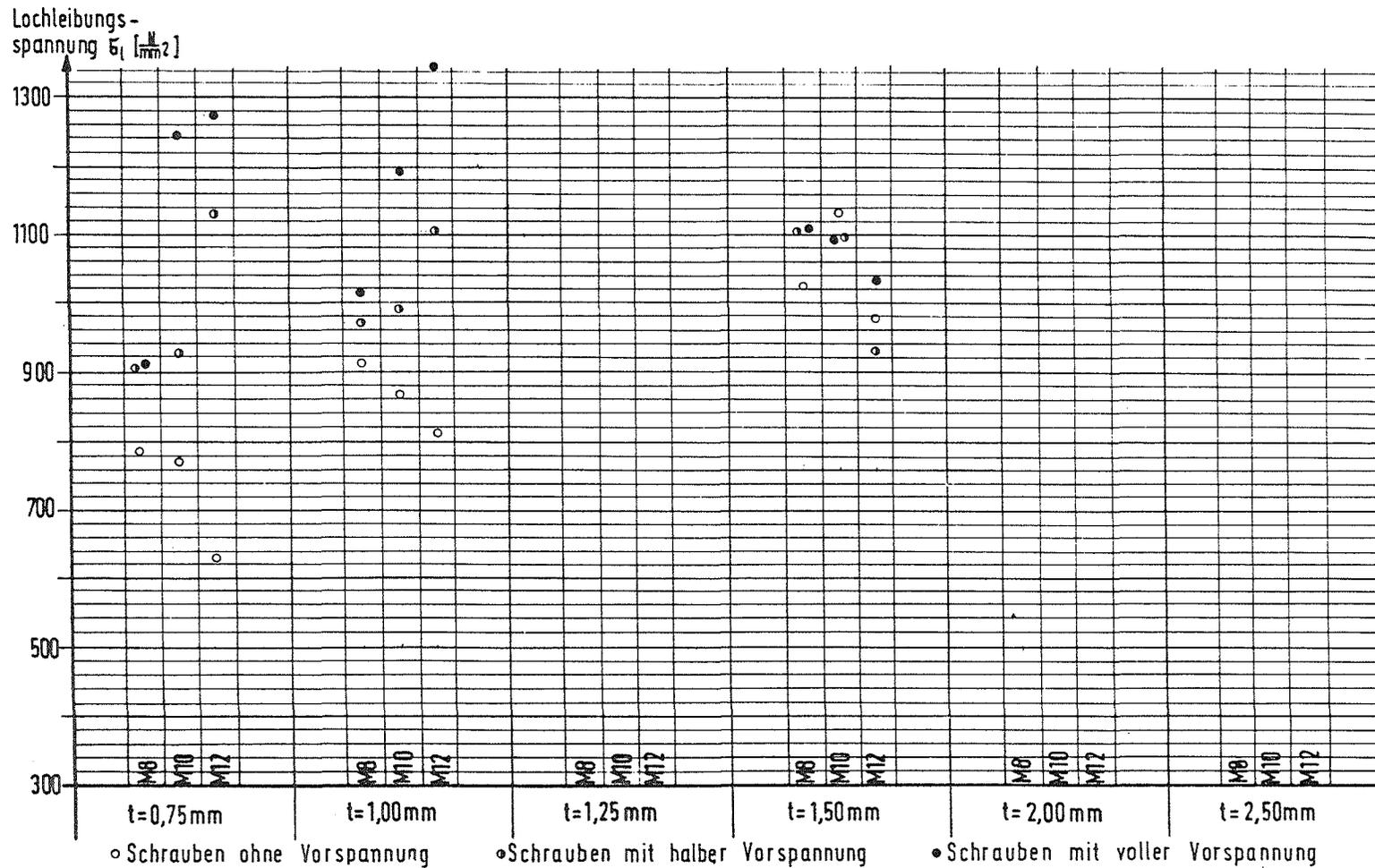


Abb. 5.8  
 Gemessene Lochleibungsspannung der aluminieren Bleche  
 bei Erreichen der Traglast (Mittelwert aus 3 Versuchen bei zügig aufgebrachtter Last)

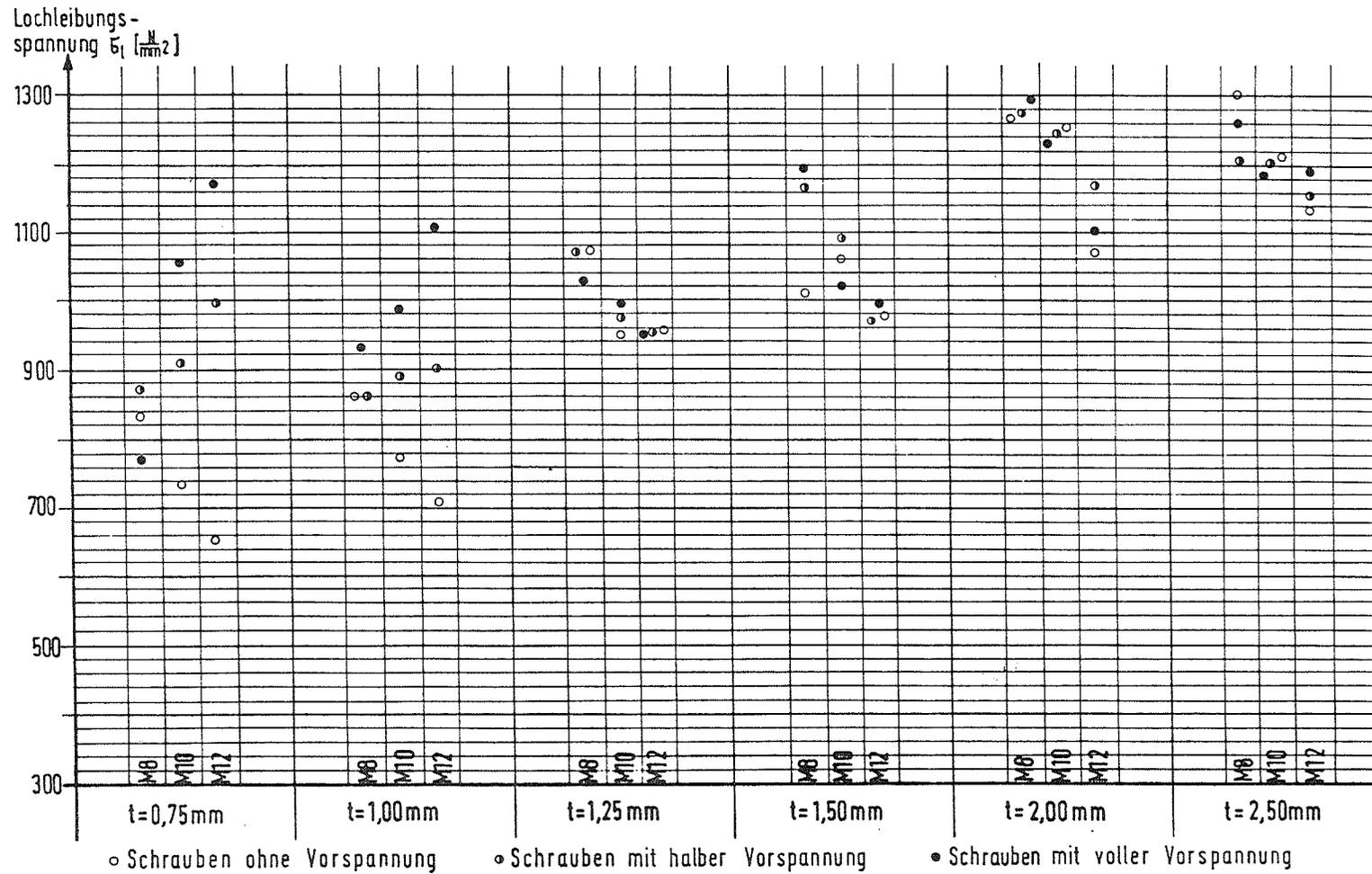


Abb. 5.9  
Gemessene Lochleibungsspannung der verzinkten Bleche  
bei Erreichen der Traglast (Mittelwert aus 3 Versuchen bei zügig aufgebracht Last)

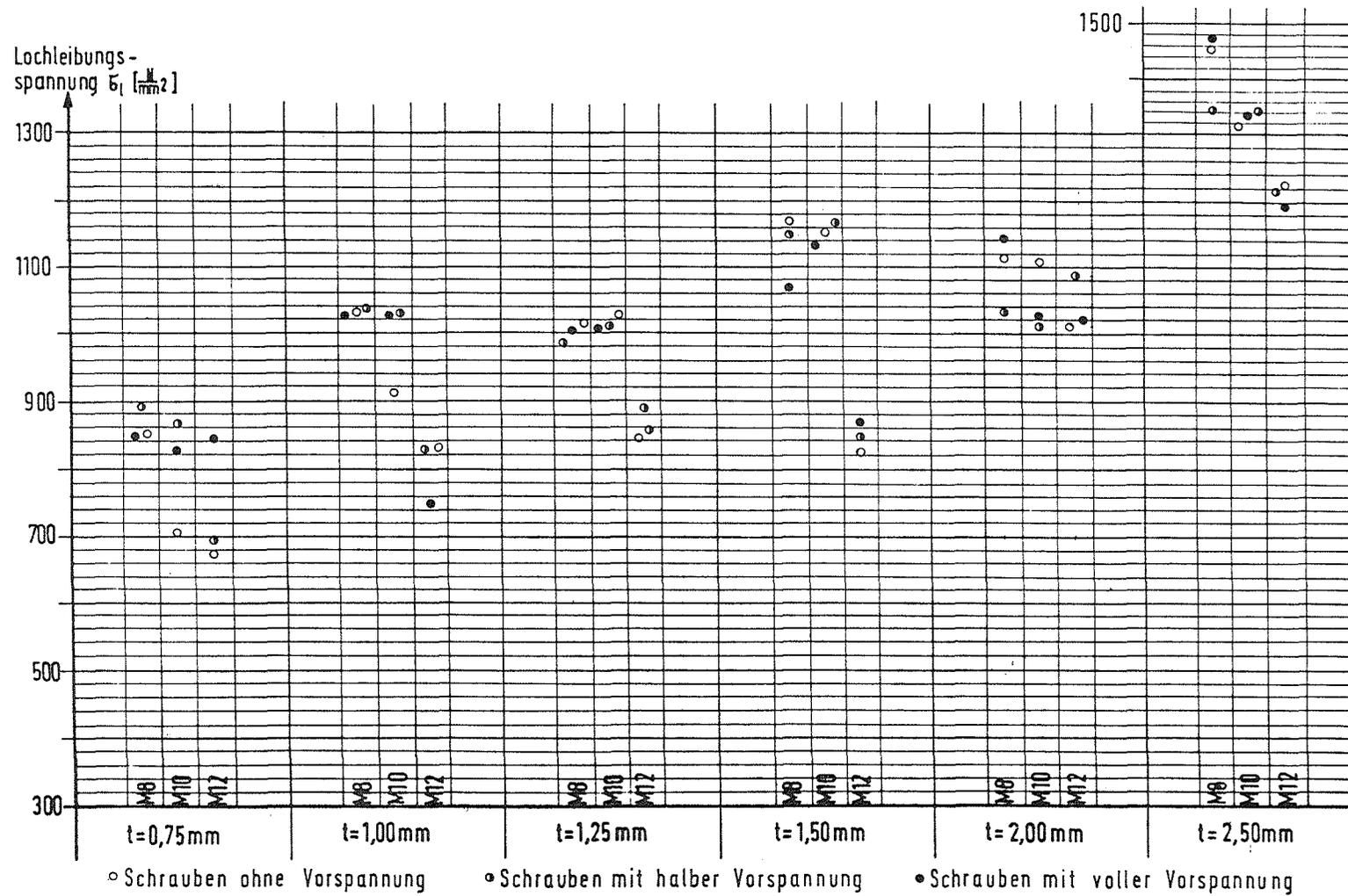


Abb. 5.10

Gemessene Lochleibungsspannung der kunststbeschichteten Bleche bei Erreichen der Traglast (Mittelwert aus 3 Versuchen bei zügig aufgebrachtener Last)

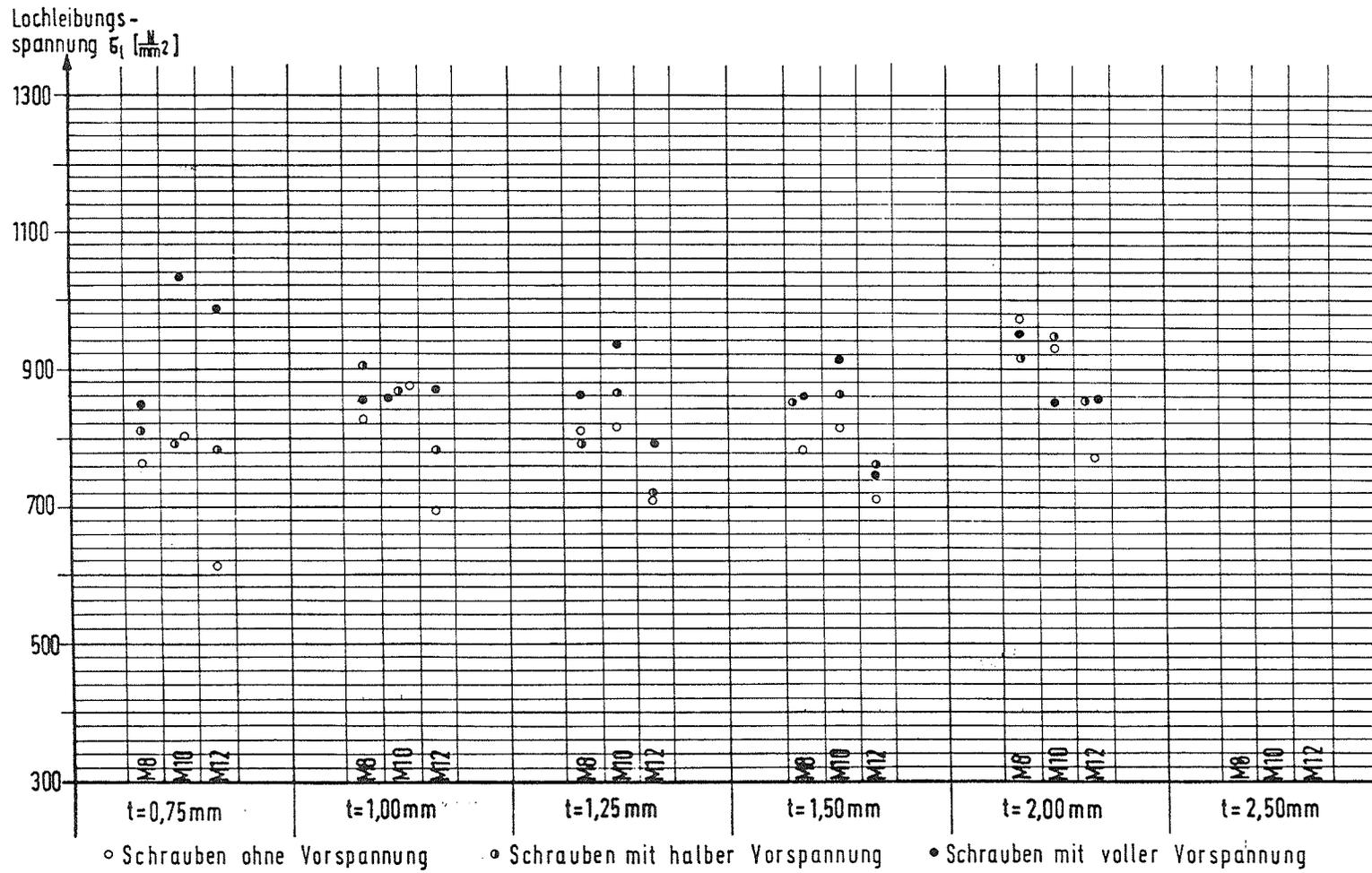


Abb. 5.11

Gemessene Lochleibungsspannung der emaillierten Bleche

bei Erreichen der Traglast (Mittelwert aus 3 Versuchen bei zügig aufgebrachtter Last)

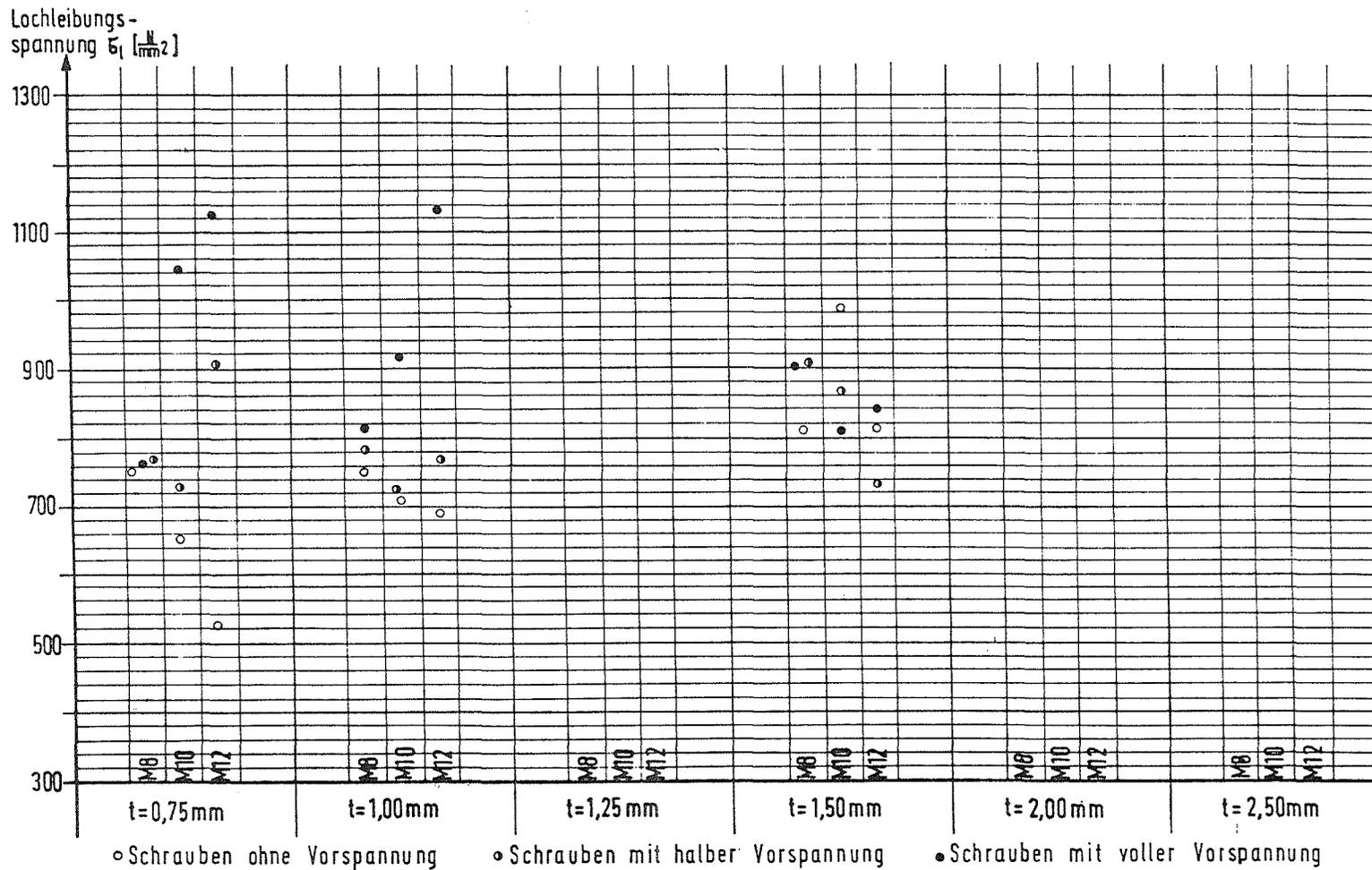


Abb. 5.12

Gemessene Lochleibungsspannung der aluinierten Bleche  
bei Erreichen der Traglast (Mittelwert aus 3 Versuchen bei langsam aufgebrachtter Last)

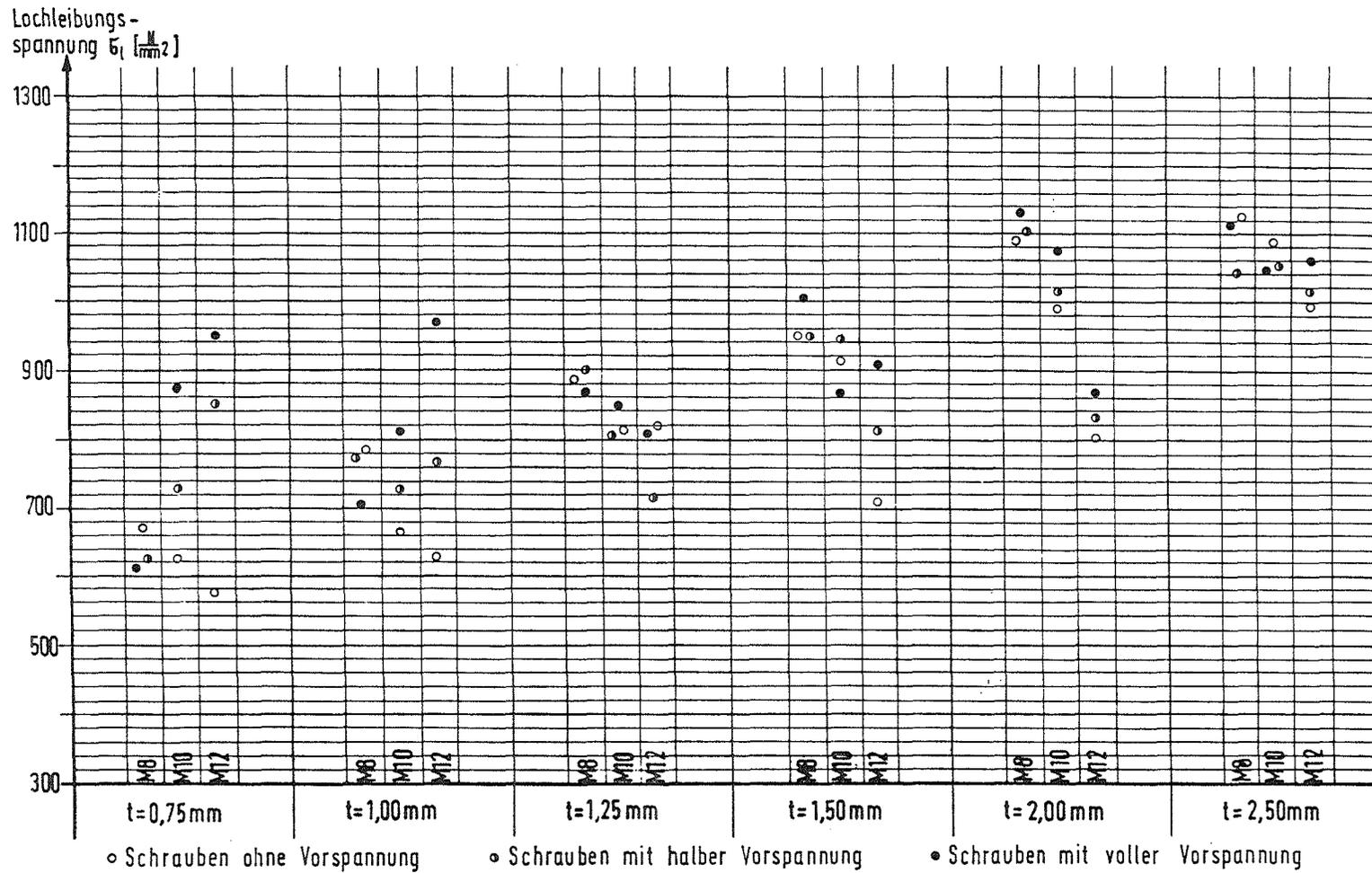


Abb. 5.13  
 Gemessene Lochleibungsspannung der verzinkten Bleche  
 bei Erreichen der Traglast (Mittelwert aus 3 Versuchen bei langsam aufgebrachtter Last)

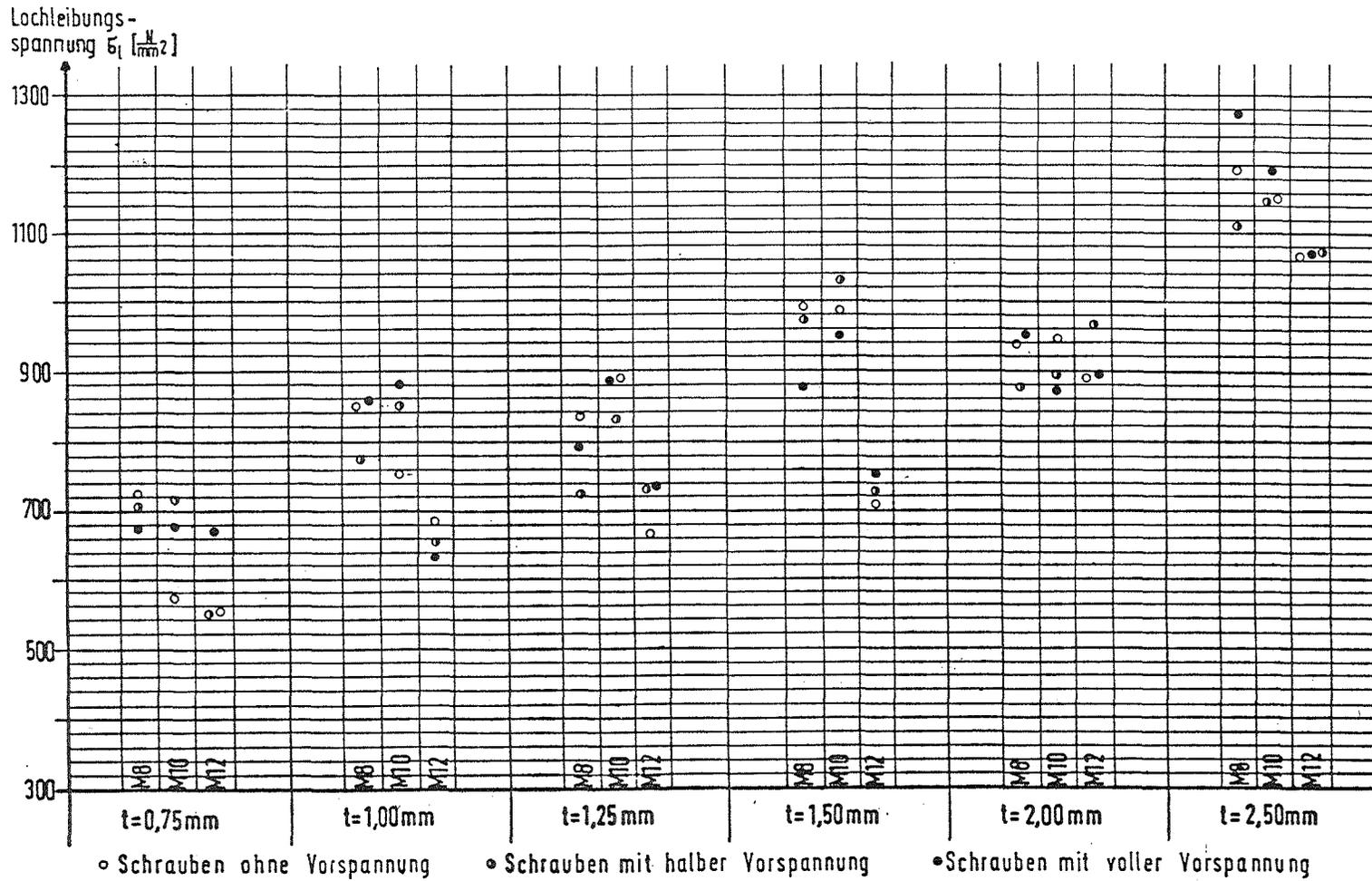


Abb. 5.14

Gemessene Lochleibungsspannung der kunststoffbeschichteten Bleche  
bei Erreichen der Traglast (Mittelwert aus 3 Versuchen bei langsam aufgebrachtener Last)

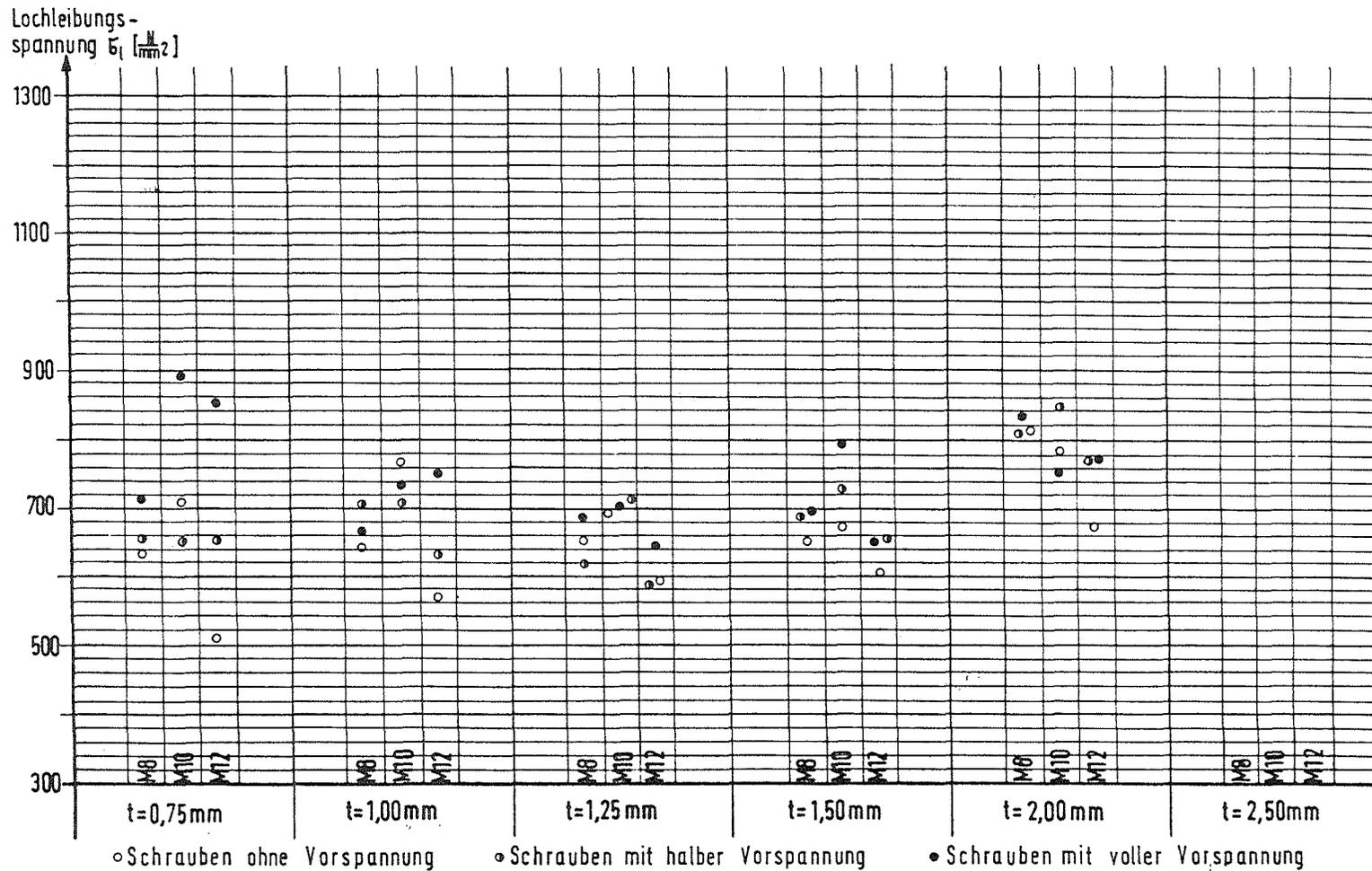


Abb. 5.15  
 Gemessene Lochleibungsspannung der emaillierten Bleche  
 bei Erreichen der Traglast (Mittelwert aus 3 Versuchen bei langsam aufgebrachter Last)

## 5.5 Auf St 37-2 bezogene Lochleibungsspannungen bei Erreichen der Tragfähigkeit

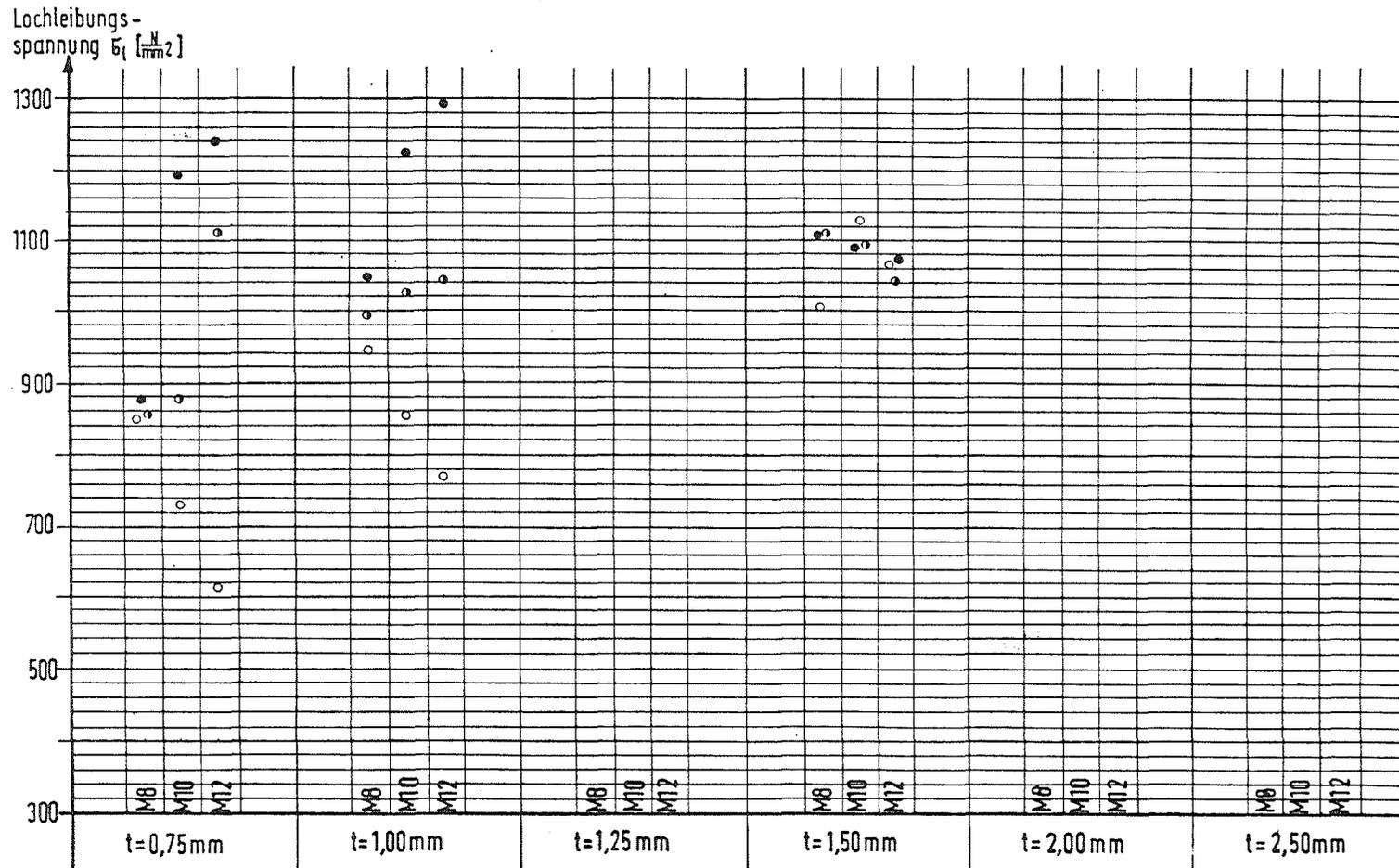
### 5.5.1 Tragfähigkeit bei zügig aufgebrachtener Last

Die nach dem in Abs. 5.2 beschriebenen Rechengang ermittelten und auf den Stahl St 37-2 bezogenen Lochleibungsspannungen sind für die vier Blechgruppen in den Abb. 5.16 bis 5.19 aufgetragen.

Um eventuelle Tendenzen oder Abhängigkeiten der Mittelwerte von den Blechgüten, den Blechdicken, den Schraubendurchmessern und den Vorspanngraden festzustellen, wurde eine lineare Regressionsanalyse vorgenommen. Allgemein ergaben die Mittelwerte eine gute Korrelation. Die absolute Übereinstimmung wird erreicht, wenn der Korrelationskoeffizient  $r = 1$  bzw.  $r = -1$  beträgt. In der Regel betrug  $r = 0,9$ . Lediglich die Lochleibungsspannungen bei voller Vorspannung lieferten teilweise Korrelationskoeffizienten, die ungünstiger waren.

In Abb. 5.20 sind für Schrauben ~~ohne~~ Vorspannung die so ermittelten Geraden der bezogenen Lochleibungsspannungen aufgetragen. Neben den Verläufen der vier Blechgüten ist auch deren gemittelter gemeinsamer Verlauf dargestellt. Beim Schraubendurchmesser M 8 besteht eine gute Übereinstimmung. Für den Schraubendurchmesser M 10 ergeben sich bei den Blechdicken  $t = 0,75$  mm, 1,0 mm und 1,25 mm größere Differenzen. Bis auf die Blechdicke  $t = 0,75$  mm sind die Abweichungen der Schraube M 12 nur gering.

Die Regressionsgeraden bei halber Vorspannung in Abb. 5.21 weisen für die Schraube M 10 und M 12 ebenfalls für die dünneren Blechdicken größere Unterschiede auf.



○ Schrauben ohne Vorspannung   • Schrauben mit halber Vorspannung   ● Schrauben mit voller Vorspannung

Abb. 5.16

Auf ST 37-2 bezogene Lochleibungsspannung der aluminieren Bleche bei Erreichen der Traglast (Mittelwert aus 3 Versuchen bei zügig aufgebracht Last)

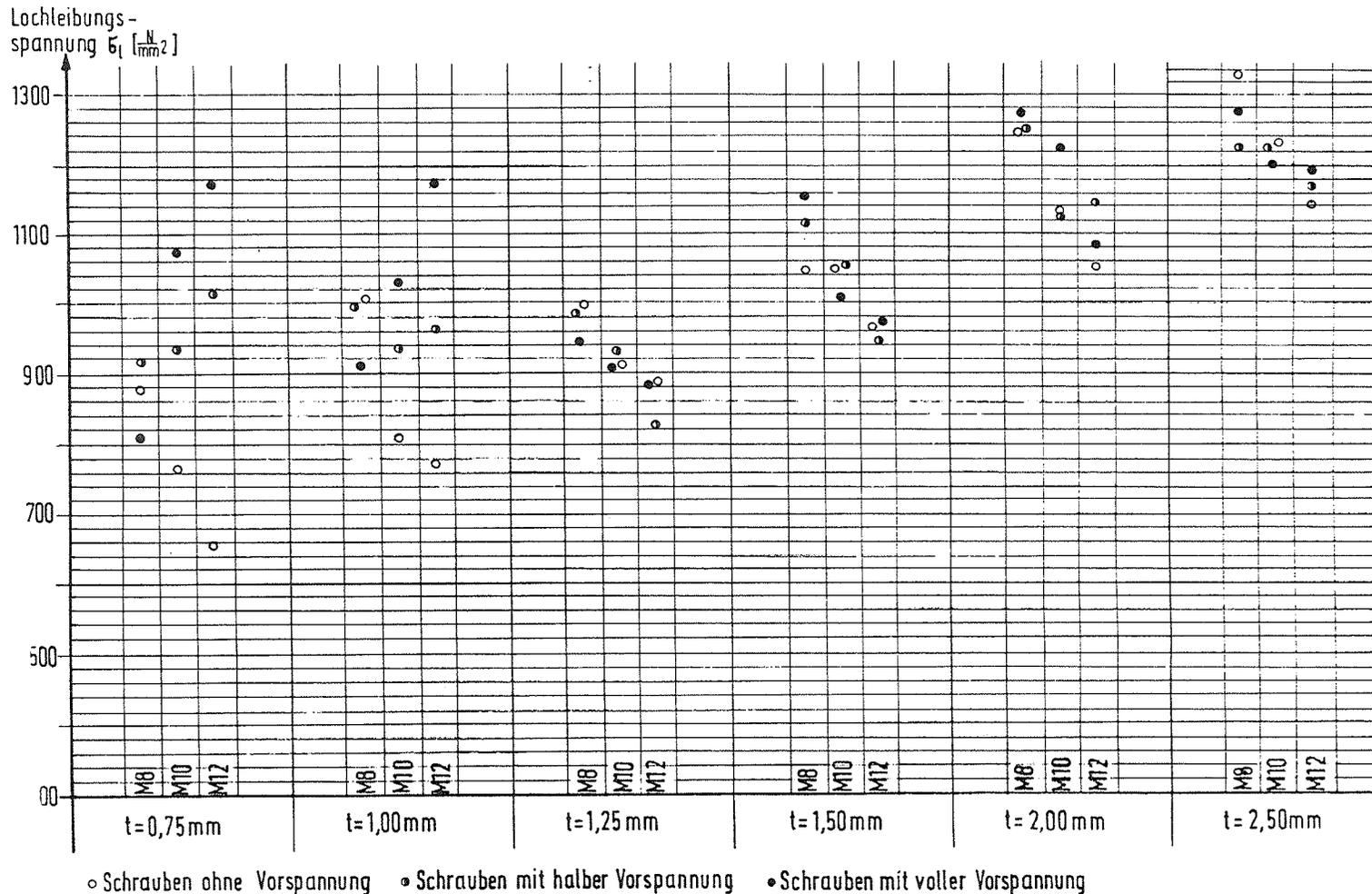
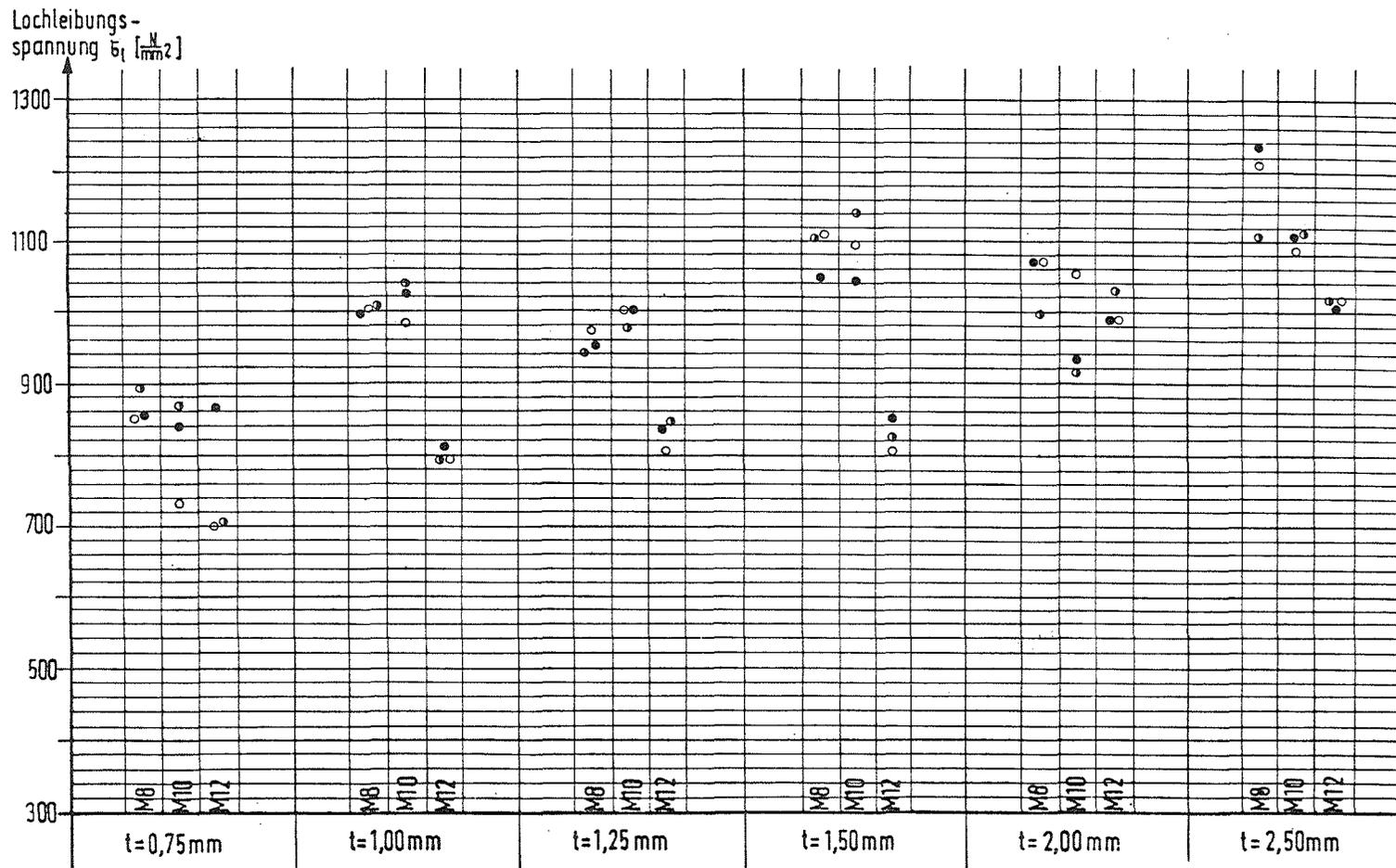


Abb. 5.17

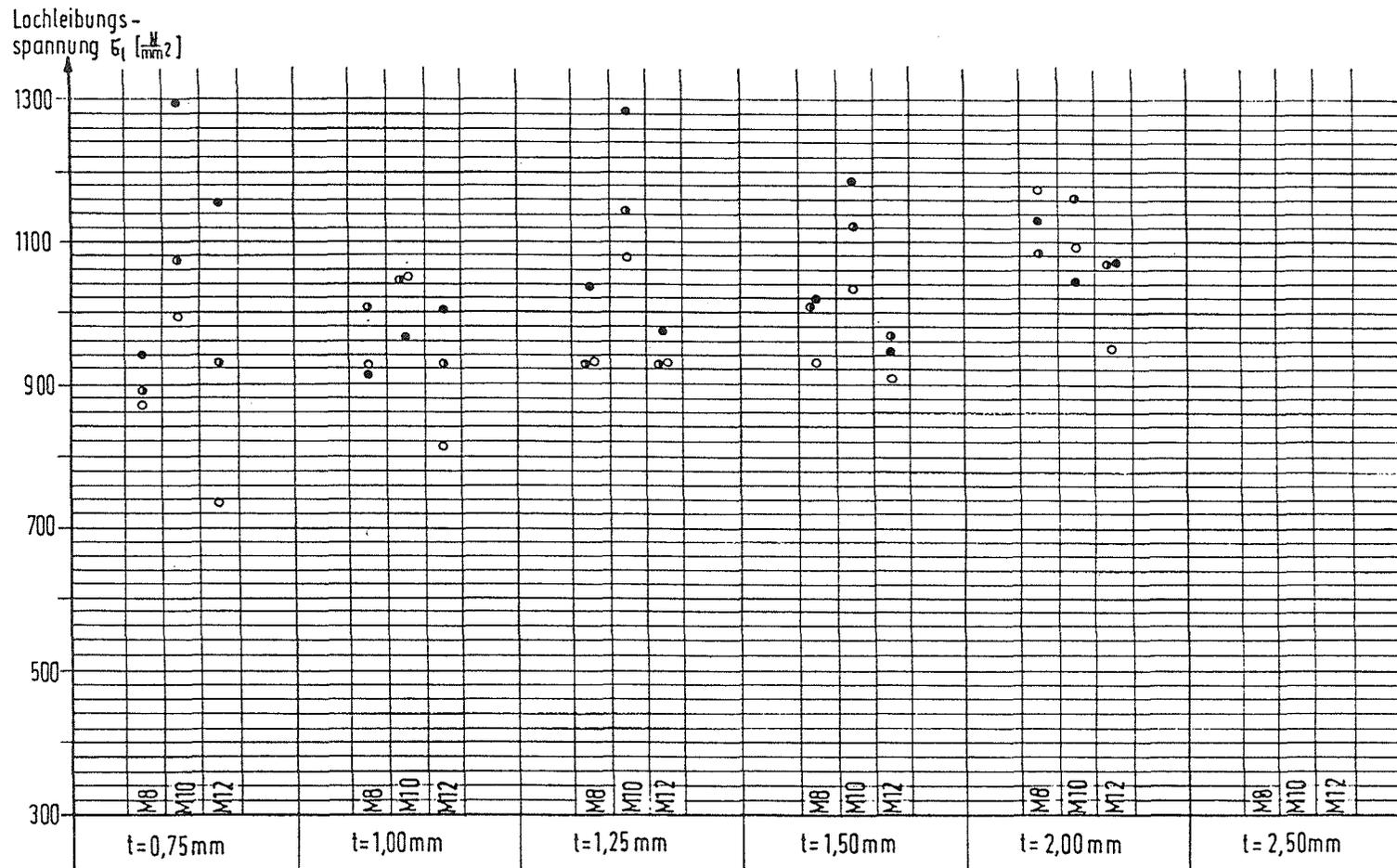
Auf St37-2 bezogene Lochleibungsspannung der verzinkten Bleche  
bei Erreichen der Traglast (Mittelwert aus 3 Versuchen bei zügig aufgebrachter Last)



○ Schrauben ohne Vorspannung    ◐ Schrauben mit halber Vorspannung    ● Schrauben mit voller Vorspannung

Abb. 518

Auf ST 37-2 bezogene Lochleibungsspannung der kunststoffbeschichteten Bleche bei Erreichen der Traglast (Mittelwert aus 3 Versuchen bei zügig aufgebrachtener Last)



○ Schrauben ohne Vorspannung    ◐ Schrauben mit halber Vorspannung    ● Schrauben mit voller Vorspannung

Abb. 5.19

Auf St 37-2 bezogene Lochleibungsspannung der emaillierten Bleche  
bei Erreichen der Traglast (Mittelwert aus 3 Versuchen bei zügig aufgebrachtter Last)

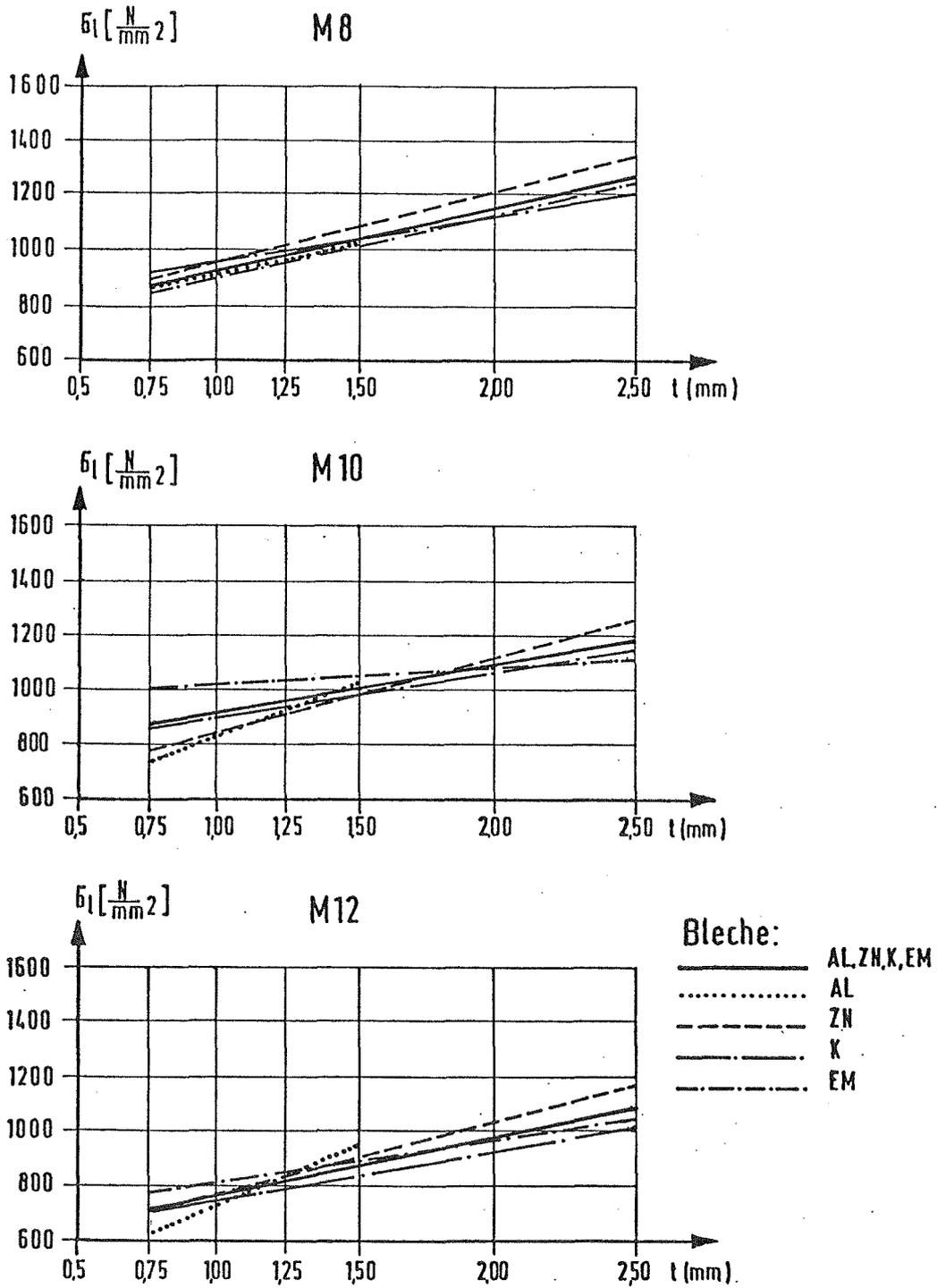


Abb. 5.20

Auf St 37-2 bezogene Lochleibungsspannungen bei Erreichen der Traglast ( ohne Vorspannung - bei zügig aufgebracht er Last )

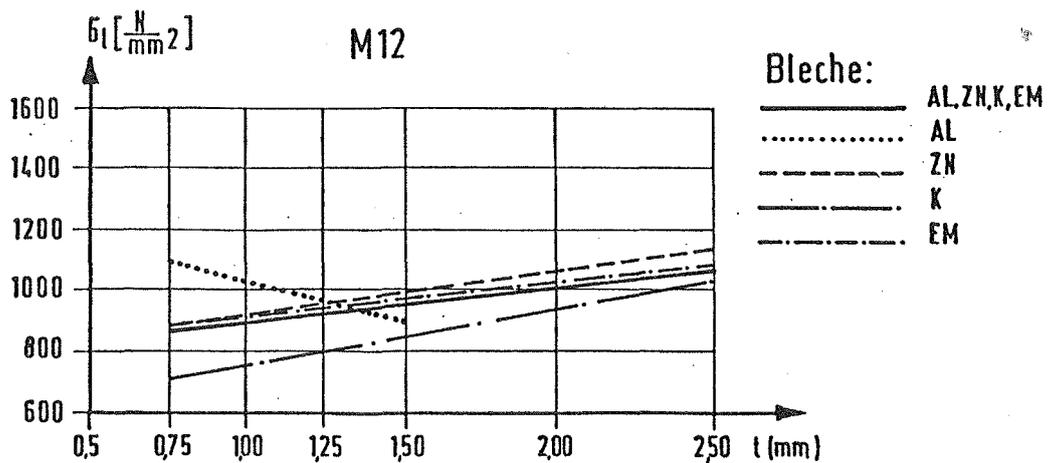
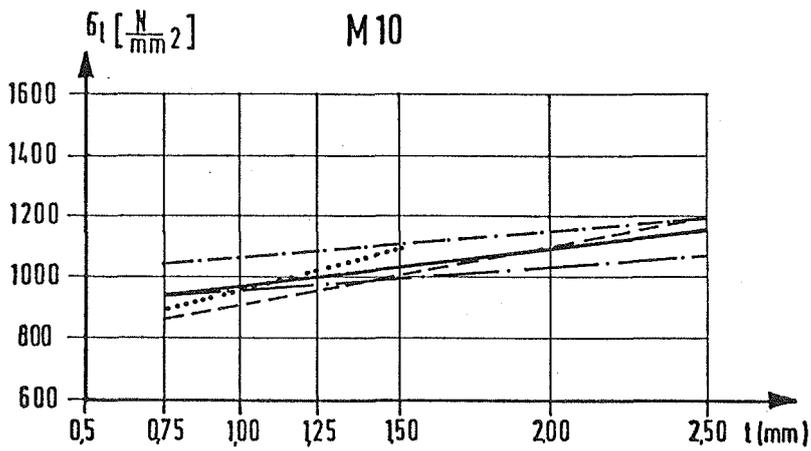
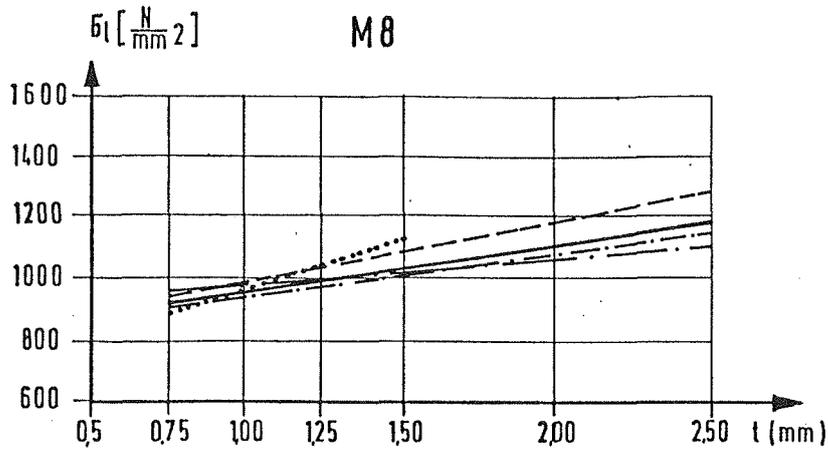


Abb. 521

Auf St 37-2 bezogene Lochleibungsspannungen bei Erreichen der Traglast ( halbe Vorspannung- bei zügig aufgebrachtter Last )

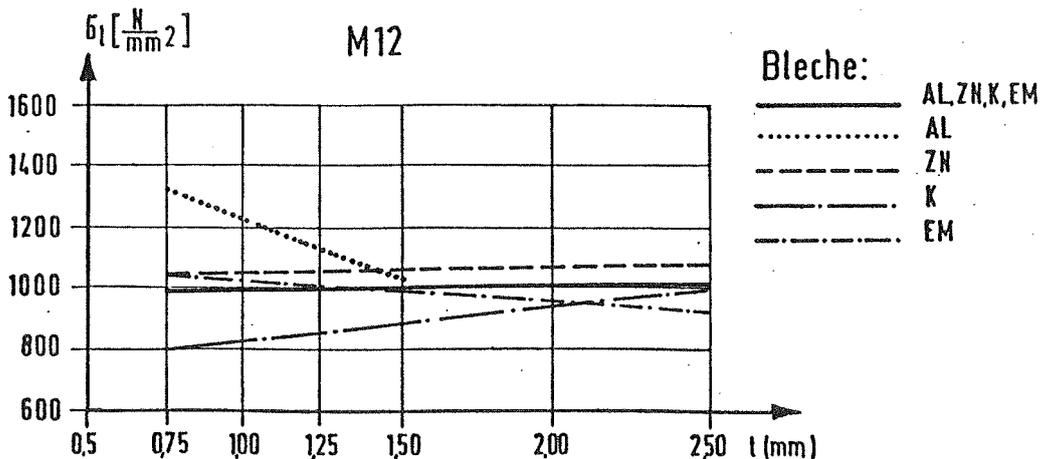
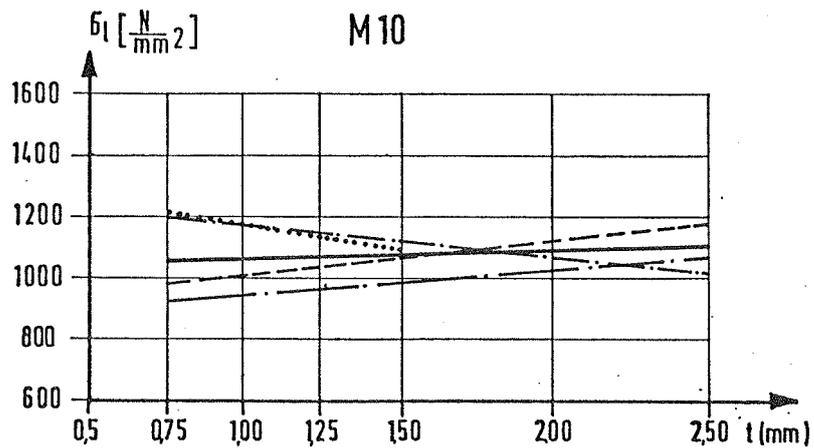
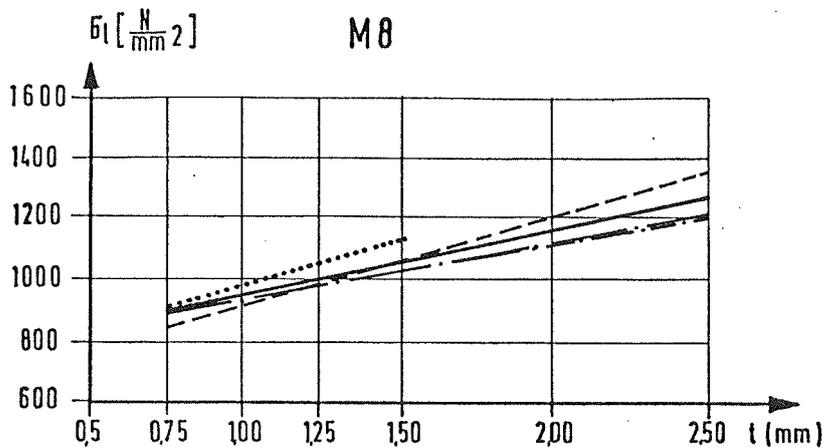


Abb.522  
 Auf St37-2 bezogene Lochleibungsspannungen bei Erreichen  
 der Traglast (volle Vorspannung-bei zügig aufgebracht Last)

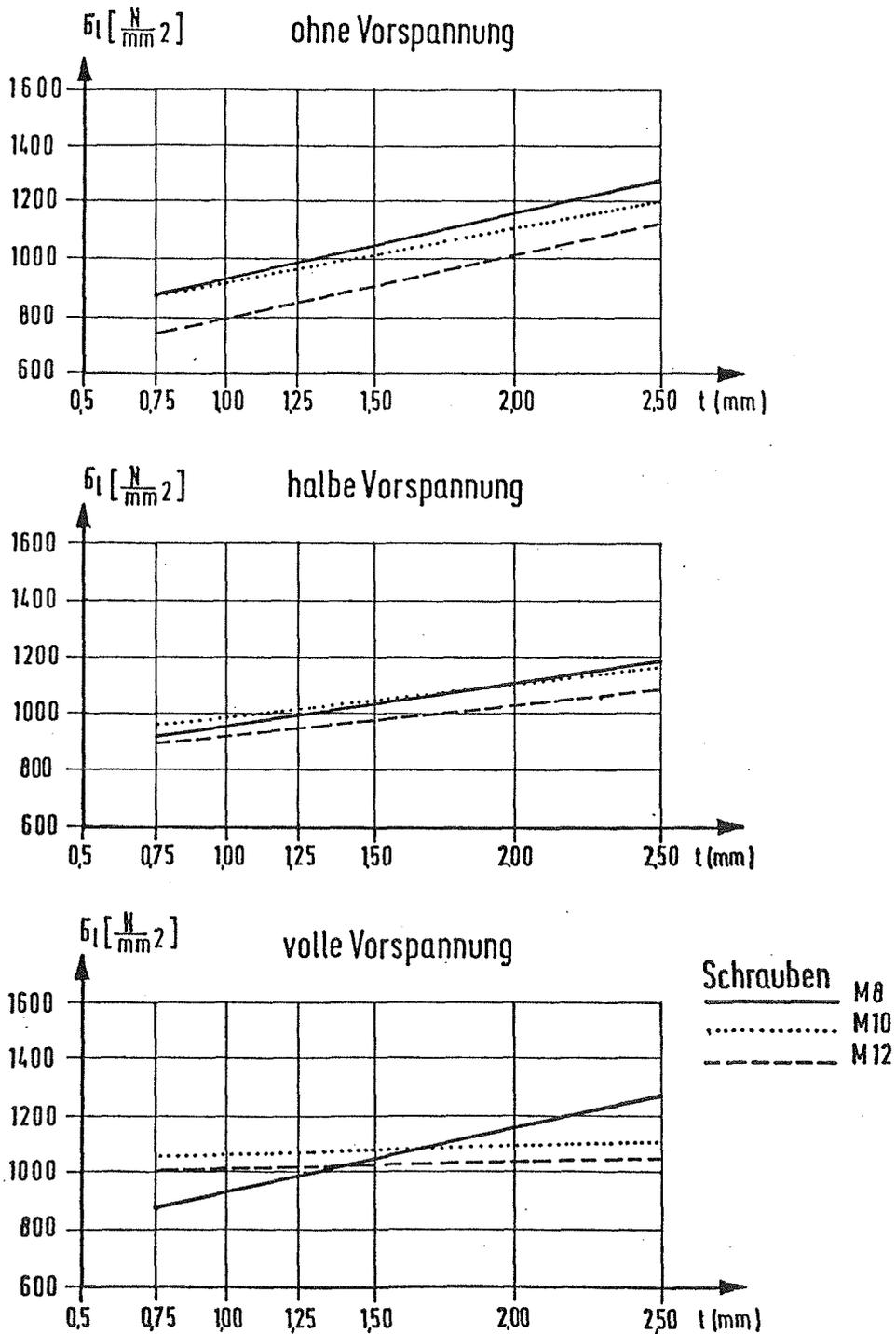


Abb.523

Auf St 37-2 bezogene Lochleibungsspannungen bei Erreichen der Traglast (für alle Bleche bei zügig aufgebrachter Last)

Besonders groß werden die Unterschiede bei **voller** Vorspannung (Abb. 5.22). Während beim Schraubendurchmesser M 8 eine gute Übereinstimmung zwischen allen Blechen besteht, sind die Unterschiede bei den Schrauben M 10 und M 12 jedoch besonders groß.

In Abb. 5.23 werden die Regressionsgeraden aller Bleche miteinander verglichen. Auffällig ist, daß bei den Schrauben ohne Vorspannung die Schrauben M 8 eine um etwa  $100 \text{ N/mm}^2$  größere Lochleibungsspannung im Bruchzustand aufweisen als die Schrauben M 12. Bei halber Vorspannung liegen die Geraden der Schraubendurchmesser näher beieinander.

Die Geraden der Schrauben M 10 und M 12 weisen für die Lochleibungsspannung bei voller Vorspannung einen annähernd konstanten Verlauf auf, während sie für die Schraubendurchmesser M 8 mit zunehmender Blechdicke größer werden. Aufgrund der Interpretation von Abb. 5.20 bis 5.23 ist festzustellen:

1. Die auf den Stahl St 37-2 bezogenen Lochleibungsspannungen im Bruchzustand nehmen mit der Blechdicke zu und zwar ohne Vorspannung stärker als bei Vorspannung der Schrauben.
2. Der Einfluß der Blechgüte ist gering und läßt keine Abhängigkeit erkennen. Jedoch treten bei den dünnen Blechen  $t = 0,75 \text{ mm}$ ,  $1,0 \text{ mm}$  und  $t = 1,25 \text{ mm}$  größere Unterschiede auf.
3. Der Einfluß des Schraubendurchmessers ermöglicht es, für die Schraube M 8 um  $100 \text{ N/mm}^2$  größere Lochleibungsspannungen als für die Schraube M 12 anzusetzen, jedoch nur bei Schrauben ohne Vorspannung. Bei voller Vorspannung ergibt die Schraube M 8 bei den dünnen Blechen geringere Lochleibungsspannungen und bei den dickeren Blechen größere Lochleibungsspannungen für den Bruchzustand, so daß insgesamt gesehen der Einfluß des Schraubendurchmessers als gering anzusehen ist.

4. Die gemeinsame Gerade der AL, ZN, K und EM-Bleche deckt die gemittelten Meßergebnisse ausreichend genau ab.

In Abb. 5.24 sind die gemessenen und auf den Stahl St 37-2 bezogenen Lochleibungsspannungen statistisch ausgewertet und die Ergebnisse dargestellt. Die Auswertung erfolgte nach dem im Eurocode Nr. 3 angegebenen und im Abs. 3.2 beschriebenen Verfahren. Aufgetragen ist jeweils der Mittelwert, der untere Bemessungswert, dem die ungünstigsten Versuchsergebnisse zugrunde liegen und der obere Bemessungswert, der den höheren Tragfähigkeiten sehr nahe kommt. Zwischen dem unteren und dem oberen Wert sind die Tragfähigkeiten der auf den St 37-2 bezogenen Lochleibungsspannungen zu erwarten, wobei die Blechgüte und der Schraubendurchmesser in der Bandbreite enthalten sind.

Der Vergleich der Schraubenvorspanngrade führt zu dem Ergebnis, daß nur für die Blechdicke  $t = 0,75 \text{ mm}$ ,  $1,00 \text{ mm}$  und  $1,25 \text{ mm}$  höhere Lochleibungsspannungen möglich sind, wenn die Schrauben vorgespannt werden. Bei den größeren Blechdicken sind die Meßergebnisse für Schrauben ohne Vorspannung, mit halber Vorspannung und voller Vorspannung annähernd gleich. Die Bandbreite zwischen dem oberen und unteren Bemessungswert beträgt etwa  $120 \text{ N/mm}^2$ .

In Abb. 5.25 sind die durch den Sicherheitsfaktor  $\gamma = 2,0$  dividierten gemessenen Lochleibungsspannungen dargestellt.

Bei den Schrauben **ohne** Vorspannung beträgt die so ermittelte Lochleibungsspannung für den unteren Meßwert bei  $t = 0,75 \text{ mm}$   $\sigma_1 = 325 \text{ N/mm}^2$  und steigt bei  $t = 2,5 \text{ mm}$  auf  $525 \text{ N/mm}^2$  an. Die Bandbreite zwischen dem oberen und unteren Bemessungswert beträgt über alle Blechdicken etwa  $120 \text{ N/mm}^2$ .

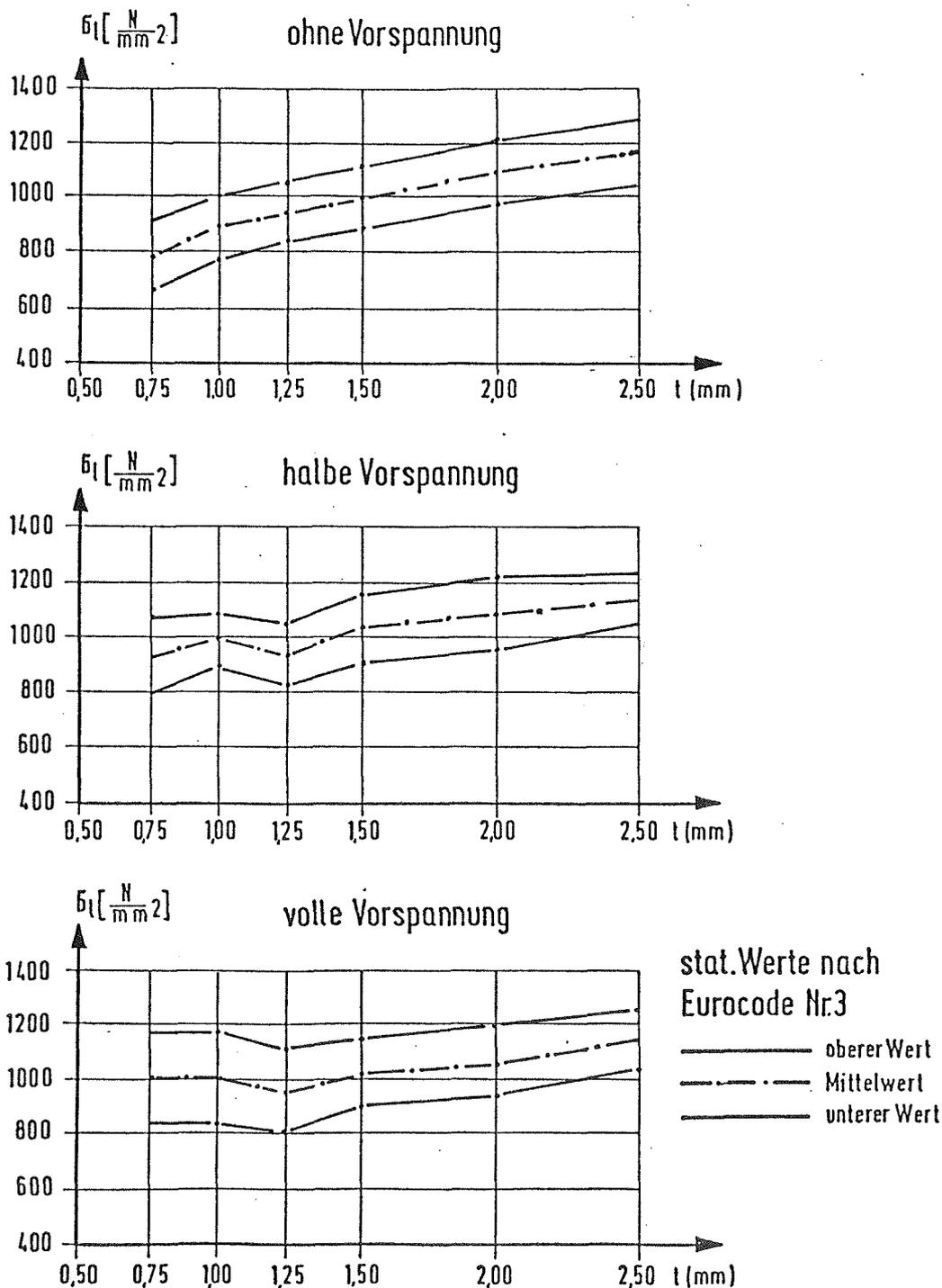


Abb. 5.24

Auf St 37-2 bezogene Lochleibungsspannungen der Al, ZN, K, EM-Bleche bei Erreichen der Traglast (bei zügig aufgebrachtter Last)

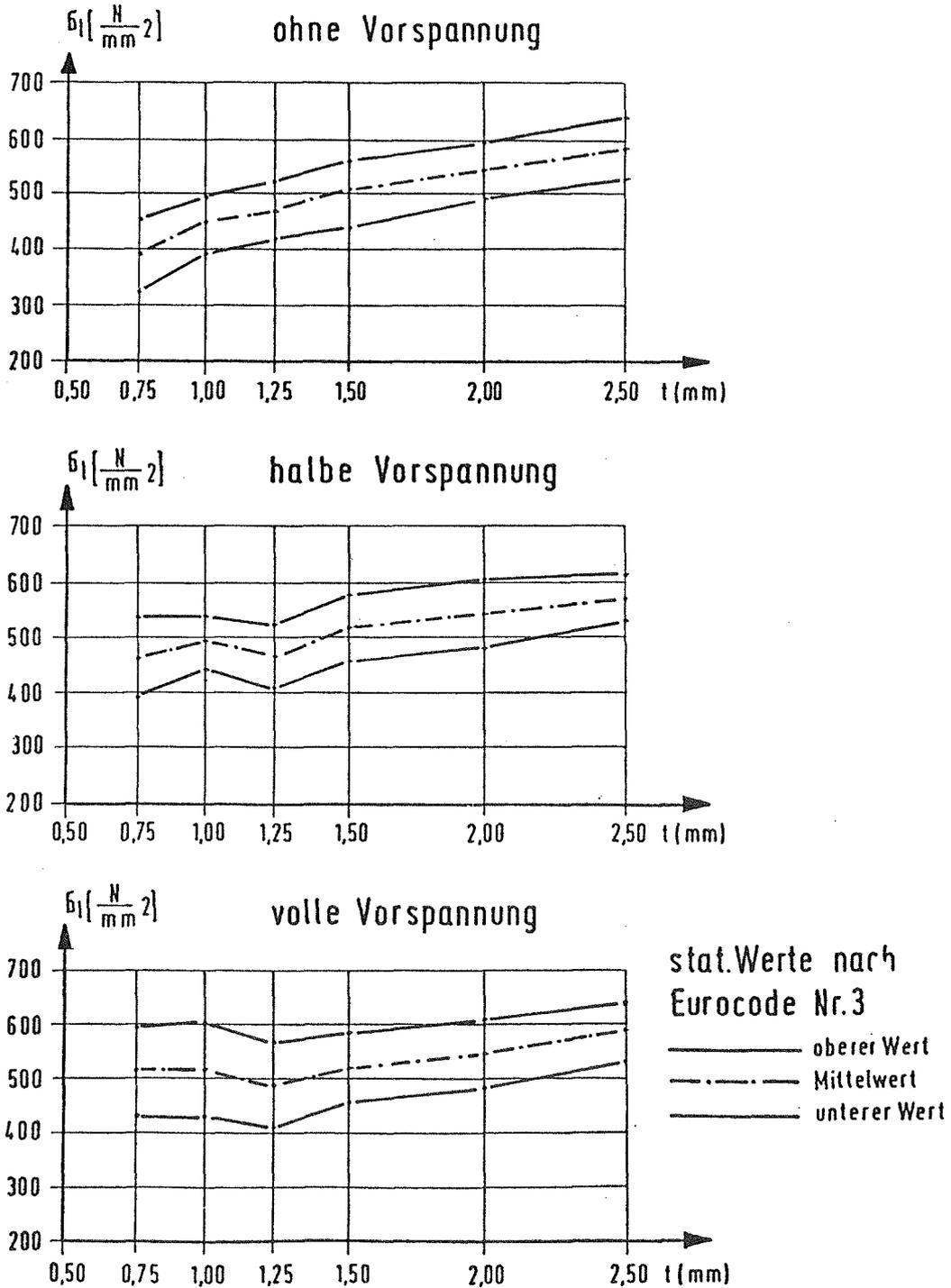


Abb. 5.25

Auf St 37-2 bezogene zulässige Lochleibungsspannung der Al, ZN, K, EM-Bleche bei Erreichen der Traglast (Sicherheit  $\gamma = 2,0$  - bei zügig aufgebrachtter Last)

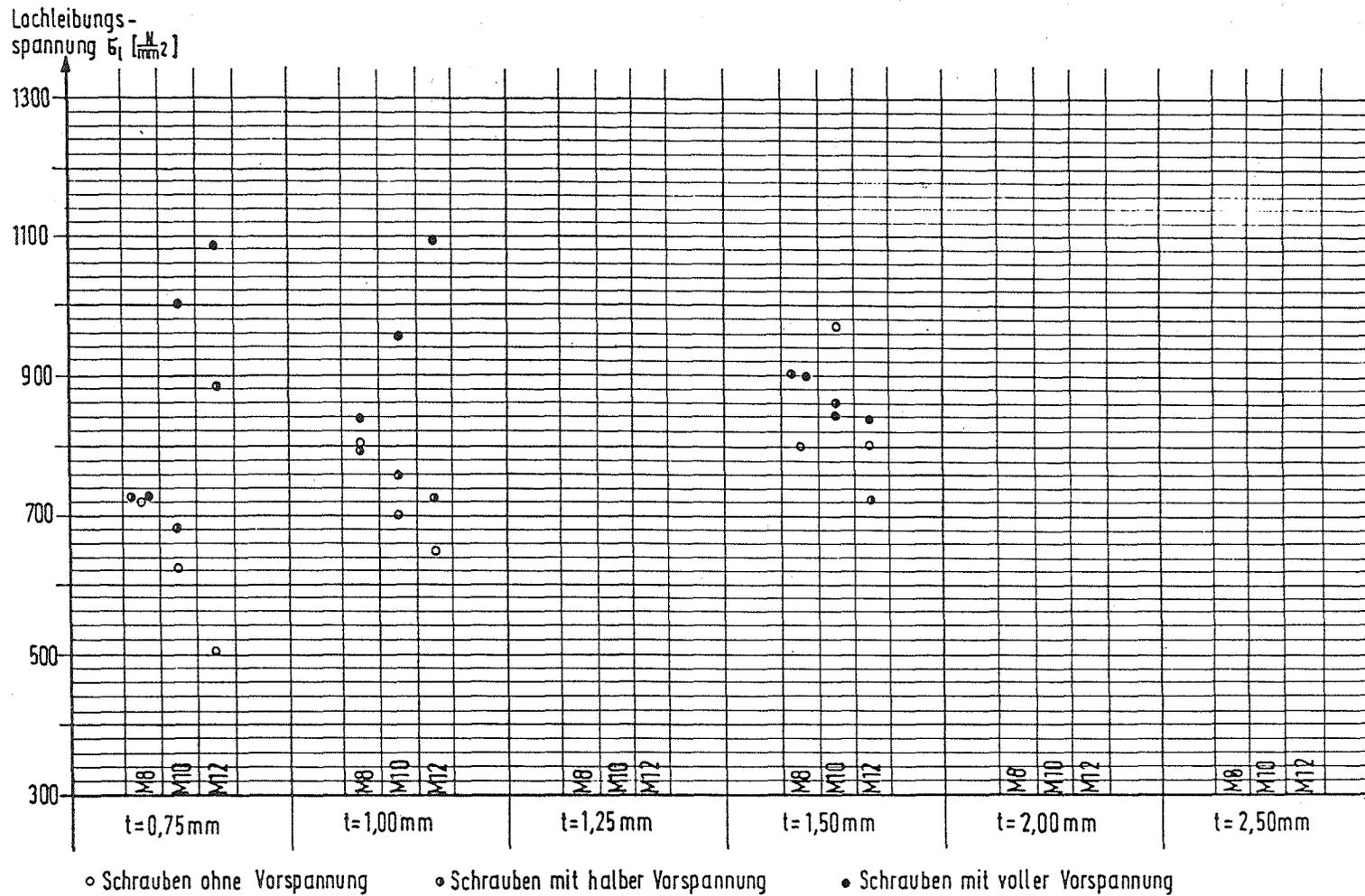


Abb. 5.26  
 Auf ST 37-2 bezogene Lochleibungsspannung der aluminieren Bleche  
 bei Erreichen der Traglast (Mittelwert aus 3 Versuchen bei langsam aufgebracht Last)

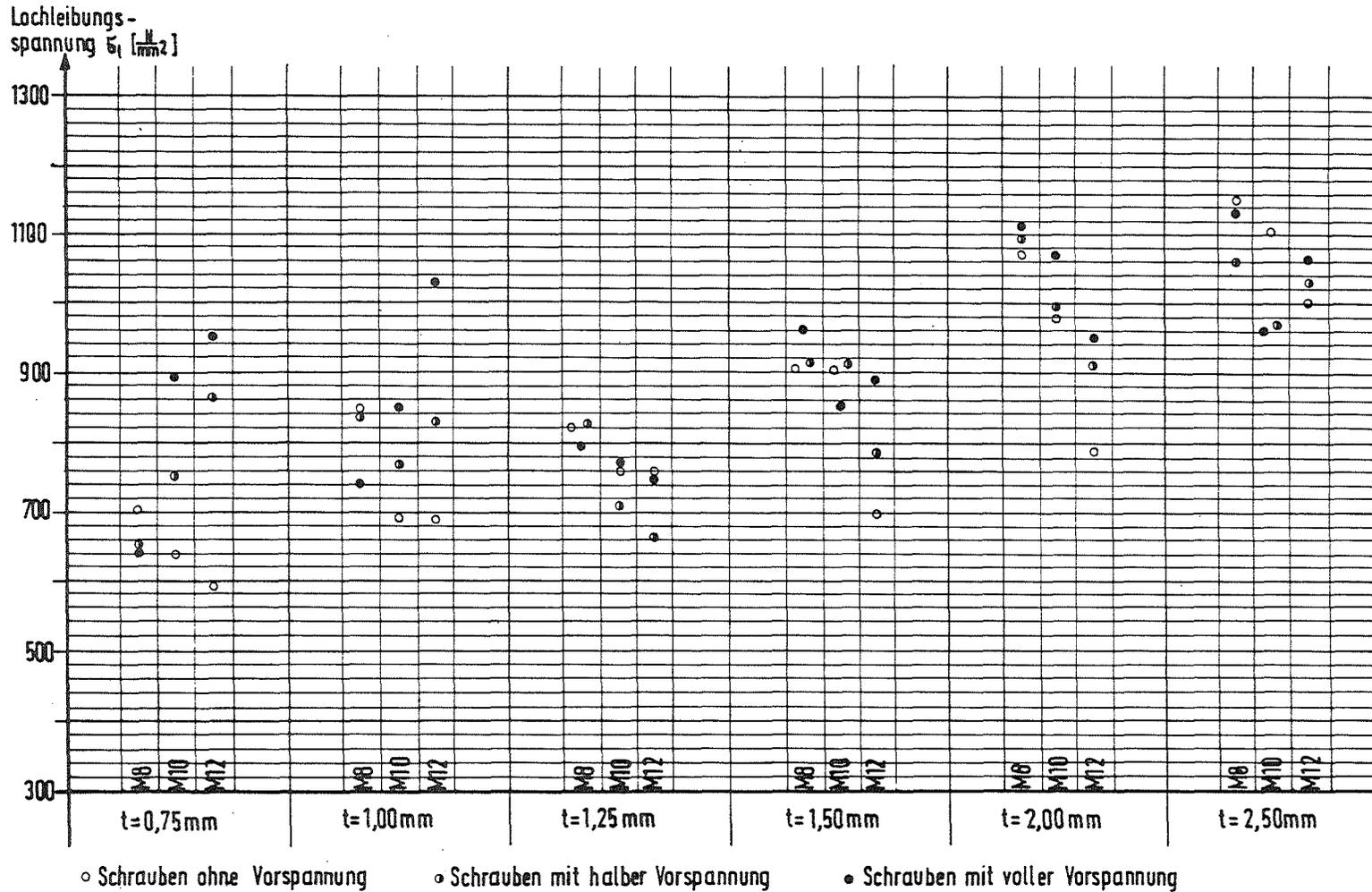
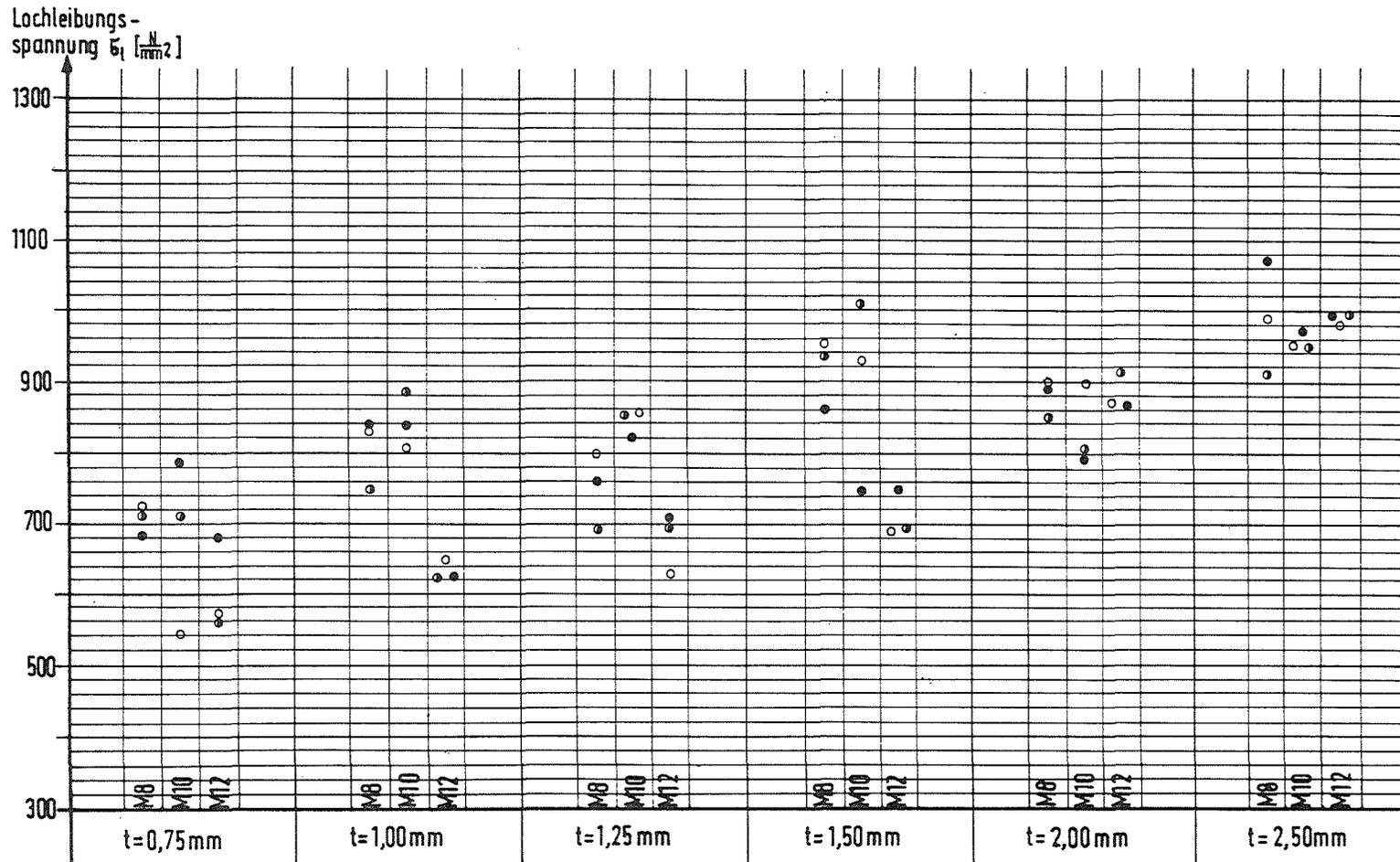


Abb. 5.27

Auf ST 37-2 bezogene Lochleibungsspannung der verzinkten Bleche  
bei Erreichen der Traglast (Mittelwert aus 3 Versuchen bei langsam aufgebrachtter Last)



○ Schrauben ohne Vorspannung    ◐ Schrauben mit halber Vorspannung    ● Schrauben mit voller Vorspannung

**Abb. 5.28**  
 Auf ST 37-2 bezogene Lochleibungsspannung derkunststoffbeschichteten Bleche  
 bei Erreichen der Traglast (Mittelwert aus 3 Versuchen bei langsam aufgebrachtener Last)

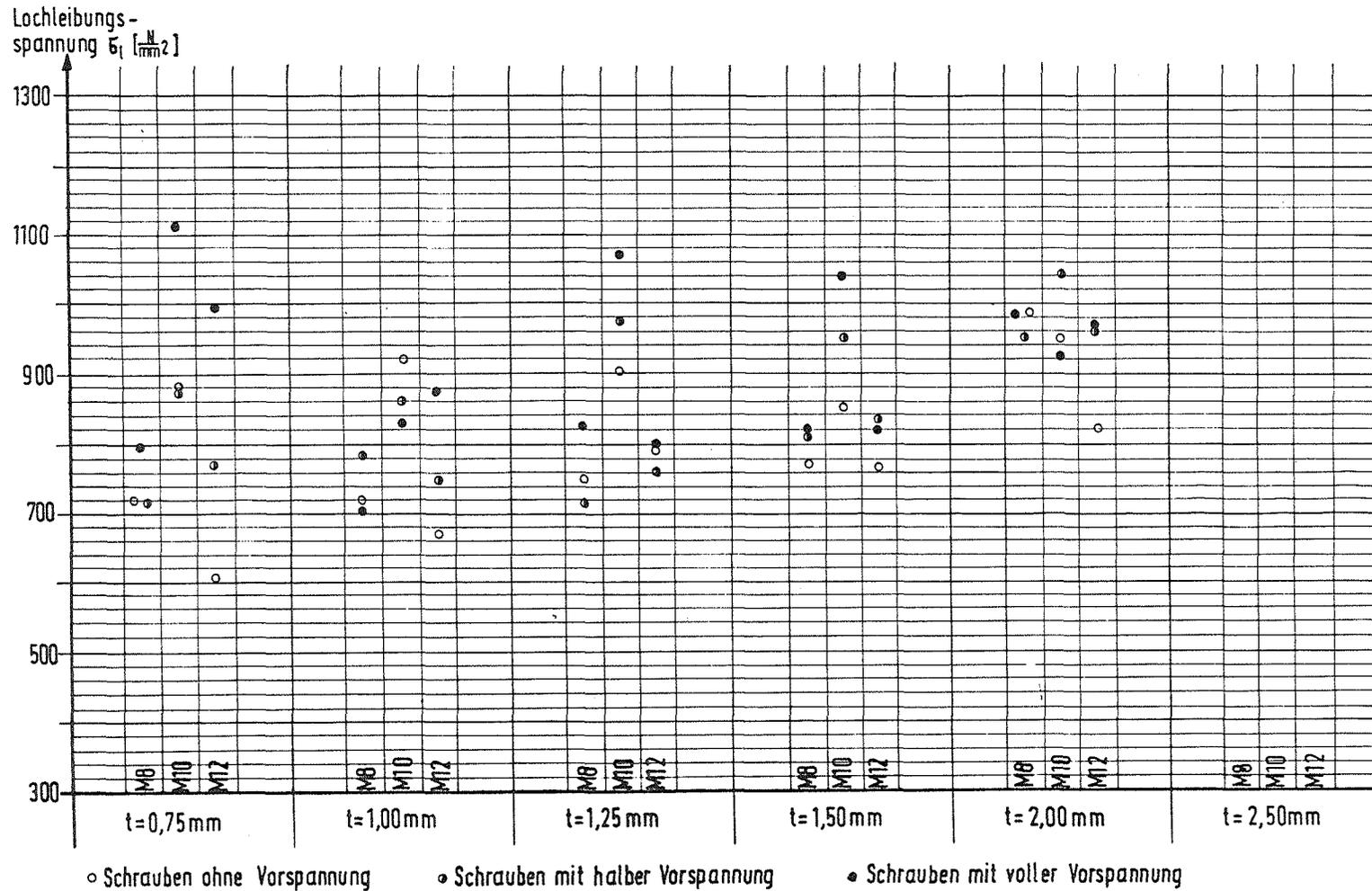


Abb. 5.29  
Auf ST 37-2 bezogene Lochleibungsspannung der emaillierten Bleche  
bei Erreichen der Traglast (Mittelwert aus 3 Versuchen bei langsam aufgebrachtener Last)

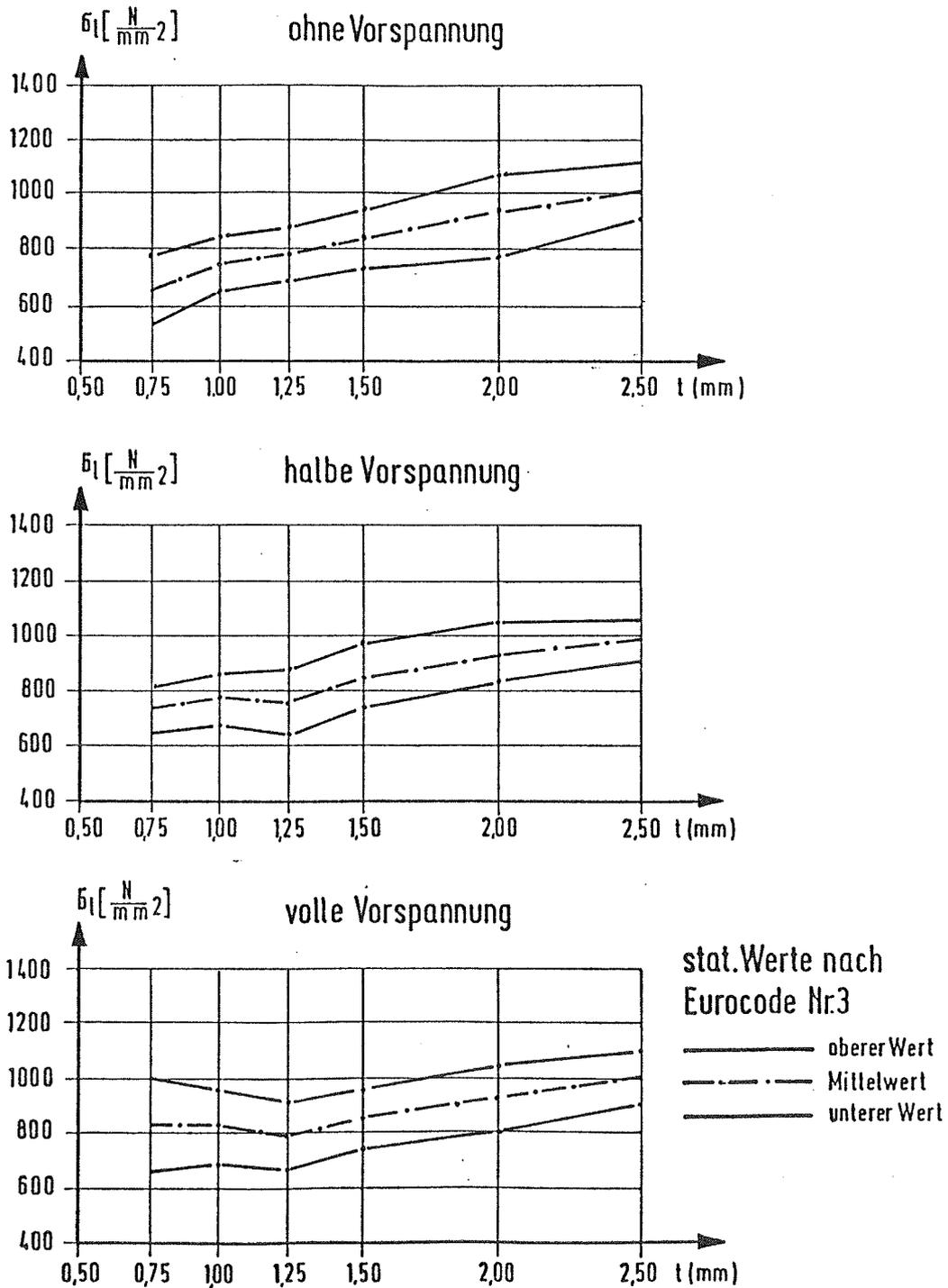


Abb. 530

Auf St 37-2 bezogene Lochleibungsspannungen der Al, Zn, K, EM-Bleche bei Erreichen der Traglast (bei langsam aufgebracht Last)

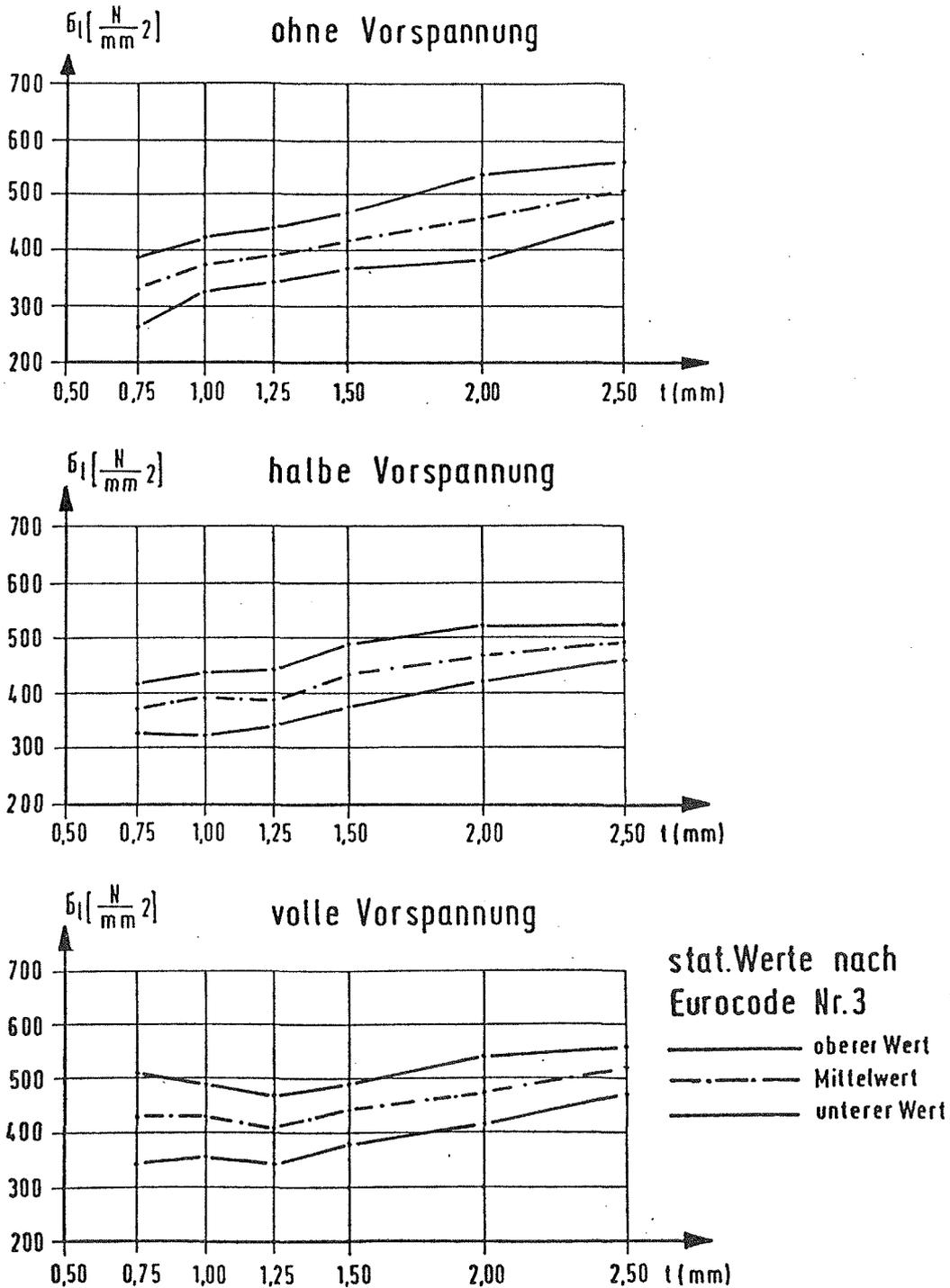


Abb. 5.31

Auf St 37-2 bezogene zulässige Lochleibungsspannung der Al, Zn, K, EM-Bleche bei Erreichen der Traglast (Sicherheit  $\gamma = 2,0$  - bei langsam aufgebrachter Last)

Die geringste Lochleibungsspannung der Schrauben mit **halber** Vorspannung beträgt bei  $t = 0,75$  mm  $\sigma_1 = 389$  N/mm<sup>2</sup> und verläuft dann annähernd konstant bis  $t = 1,25$  mm. Danach steigt die Lochleibungsspannung annähernd linear an und beträgt bei  $t = 2,5$  mm  $\sigma_1 = 530$  N/mm<sup>2</sup>. Hier ist die Bandbreite zwischen dem oberen und unteren Bemessungswert bei  $t = 0,75$  mm am größten und beträgt  $\Delta\sigma_1 = 145$  N/mm<sup>2</sup>; bei  $t = 2,5$  mm beträgt  $\Delta\sigma_1 = 82$  N/mm<sup>2</sup>.

Eine noch größere Bandbreite ergibt sich für die Schrauben mit **voller** Vorspannung. Für die Blechdicke  $t = 0,75$  mm beträgt der untere Bemessungswert  $\sigma_1 = 432$  N/mm<sup>2</sup> und der obere Wert  $\sigma_1 = 594$  N/mm<sup>2</sup>. Der geringste Wert wurde für  $t = 1,25$  mm mit  $\sigma_1 = 410$  N/mm<sup>2</sup> ermittelt. Bei den dickeren Blechen steigt die Lochleibungsspannung dann annähernd linear an und erreicht bei  $t = 2,5$  mm einen Wert von  $\sigma_1 = 533$  N/mm<sup>2</sup>.

Im Vergleich hierzu sind nach DIN 18 800 T 1 Tab. 7 im Lastfall HZ für rohe Schrauben als zulässige Lochleibungsspannungen  $\sigma_1 = 320$  N/mm<sup>2</sup> anzusetzen. Für Schrauben mit nicht planmäßiger Vorspannung beträgt zul.  $\sigma_1 = 430$  N/mm<sup>2</sup>.

### 5.5.2 Tragfähigkeit bei langsam aufgebrachtter Last

Die mit dem Abminderungsfaktor  $a_D$  multiplizierten und auf den Stahl St 37-2 bezogenen Lochleibungsspannungen der Bruchlast sind für die vier Blechgruppen in den Abb. 5.26 bis 5.29 dargestellt.

In Abb. 5.30 ist die Auswertung aller Meßergebnisse aufgetragen. Die Lochleibungsspannungen bei langsamer Belastung (Dauerlast) sind etwa um das 0,83fache geringer als die Lochleibungsspannungen bei zügiger Lastaufbringung. Ansonsten treten hier die gleichen Besonderheiten, bzw. Abhängigkeiten auf, wie sie unter Abs. 5.5.1 beschrieben wurden.

In Abb. 5.31 werden die Lochleibungsspannungen ermittelt, die sich gegenüber einer Traglastspannung mit 2facher Sicherheit ergeben. Bei den Schraubverbindungen **ohne** Vorspannung ergibt der untere Bemessungswert, bei einer Blechdicke  $t = 0,75$  mm, einen Wert  $\sigma_1 = 264$  N/mm<sup>2</sup>. Bei der Blechdicke  $t = 2,5$  mm steigt die Lochleibungsspannung auf  $\sigma_1 = 456$  N/mm<sup>2</sup> an. Die größte Bandbreite zwischen dem unteren und oberen Bemessungswert beträgt bei  $t = 2,0$  mm  $\Delta\sigma_1 = 153$  N/mm<sup>2</sup>.

Die Verbindungen mit **halber** Vorspannung erbringen für den gemittelten Meßwert der Blechdicke  $t = 0,75$  mm  $\sigma_1 = 372$  N/mm<sup>2</sup> und für den unteren Bemessungswert  $329$  N/mm<sup>2</sup>. Zwischen den Blechdicken  $t = 1,25$  mm und  $t = 2,5$  mm beträgt für den unteren Bemessungswert  $\sigma_1 = 460$  N/mm<sup>2</sup> und für den oberen Bemessungswert  $\sigma_1 = 527$  N/mm<sup>2</sup>.

Für die ermittelte Lochleibungsspannung bei Schrauben mit **voller** Vorspannung liefert die Blechdicke  $t = 1,25$  mm die kleinsten Werte. Für den unteren Bemessungswert beträgt  $\sigma_1 = 344$  N/mm<sup>2</sup>, der bis  $t = 2,5$  mm gleichmäßig auf  $\sigma_1 = 472$  N/mm<sup>2</sup> ansteigt. Die größte Bandbreite zwischen dem oberen und unteren Bemessungswert beträgt bei  $t = 0,75$  mm  $\Delta\sigma_1 = 162$  N/mm<sup>2</sup>.

In DIN 18 800 T 1 Tab. 7 werden als zulässige Lochleibungsspannungen für den Lastfall Hauptlasten für die rohen Schrauben zul.  $\sigma_1 = 280$  N/mm<sup>2</sup> und für die nicht planmäßig vorgespannten Schrauben zul.  $\sigma_1 = 380$  N/mm<sup>2</sup> angegeben.

### 5.6 Auf St 37-2 bezogene Lochleibungsspannung bei einem Verschiebungsweg von 10 mm und langsam aufgebrachtter Belastung

Eine Betrachtung der Ergebnisse bei zügig aufgebrachtter Belastung wurde nicht vorgenommen, da die ermittelten Lochleibungsspannungen bei langsamer Lastaufbringung kleinere Sicherheiten ergeben. Das ergibt sich aus der Tatsache, daß das Verhältnis der zulässigen Lochleibungsspannungen für den Lastfall Hauptlasten zum Lastfall Haupt- und Zusatzlasten mit 0,88 größer ist als der hier ermittelte Abminderungsfaktor  $a_D = 0,81$  bis 0,84.

Die für einen Verschiebungsweg von 10 mm ermittelten und auf St 37-2 bezogenen Lochleibungsspannungen für die vier Blechgruppen sind in den Abb. 5.32 bis 5.35 dargestellt.

Bevor der Verschiebungsweg von 10,0 mm gemessen wurde, versagten häufig die Schraubverbindungen mit halber und mit voller Vorspannung. Eine Ausnahme stellen die K-Bleche dar, hier sind größere Verformungen erforderlich bis die Tragfähigkeit erschöpft ist. Die Spannungen sind durch einen Doppelkreis markiert, bei denen die Tragfähigkeit vorher erreicht wurde. Ebenso wie für die Lochleibungsspannungen der Traglasten ist auf den Abb. 5.32 bis 5.33 eine Zunahme der Lochleibungsspannungen mit zunehmender Blechdicke erkennbar.

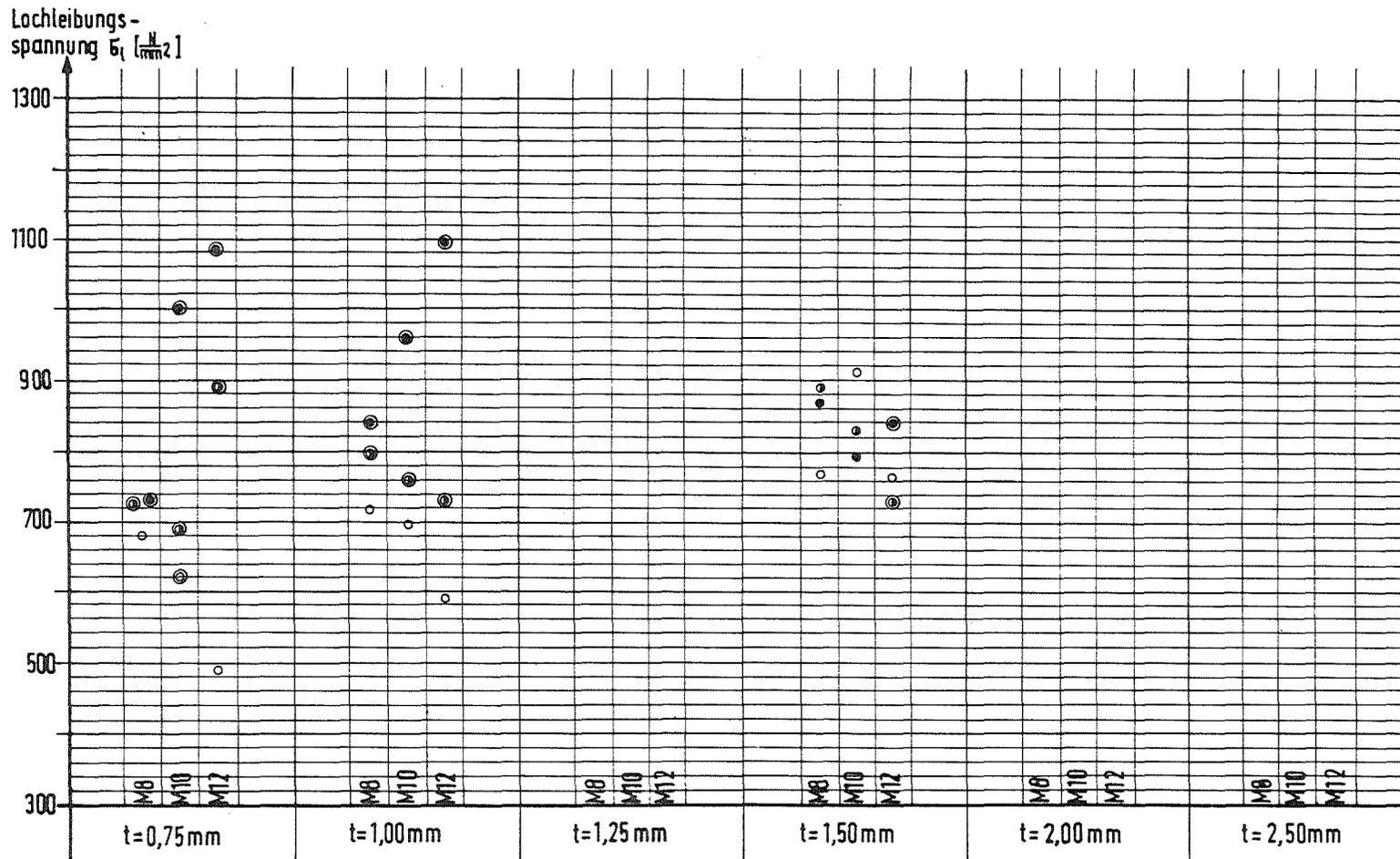
In Abb 5.36 sind die statistisch ausgewerteten Lochleibungsspannungen aufgetragen. Bei den Schraubverbindungen **ohne** Vorspannung beträgt der Mittelwert  $\bar{\sigma}_1 = 606 \text{ N/mm}^2$  bei  $t = 0,75 \text{ mm}$  und steigt um das 1,5fache bei  $t = 2,5 \text{ mm}$  an. Bei den Schraubverbindungen mit **halber** Vorspannung ist der Anstieg dagegen geringer. Von  $\bar{\sigma}_1 = 727 \text{ N/mm}^2$  steigt der Mittelwert bei  $t = 0,75 \text{ mm}$  um das 1,25fache bei  $t = 2,5 \text{ mm}$  an.

Noch geringer ist der Anstieg für die Schrauben mit **voller** Vorspannung, jedoch liegt die Lochleibungsspannung um das 1,4fache höher als für Schrauben ohne Vorspannung. Der Mittelwert steigt von  $\sigma_1 = 850 \text{ N/mm}^2$  bei  $t = 0,75 \text{ mm}$  auf  $\sigma_1 = 957 \text{ N/mm}^2$  bei  $t = 2,50 \text{ mm}$  an.

In Abb. 5.37 sind die durch den Sicherheitsbeiwert  $\gamma = 1,75$  dividierten Lochleibungsspannungen aufgetragen. Für die Schrauben **ohne** Vorspannung errechnet sich für den unteren Bemessungswert bei  $t = 0,75 \text{ mm}$   $\sigma_1 = 293 \text{ N/mm}^2$ , der bei  $t = 2,5 \text{ mm}$  auf  $\sigma_1 = 480 \text{ N/mm}^2$  ansteigt. Die größte Bandbreite zwischen dem oberen und unteren Bemessungswert beträgt bei  $t = 1,50 \text{ mm}$   $\Delta\sigma_1 = 135 \text{ N/mm}^2$ .

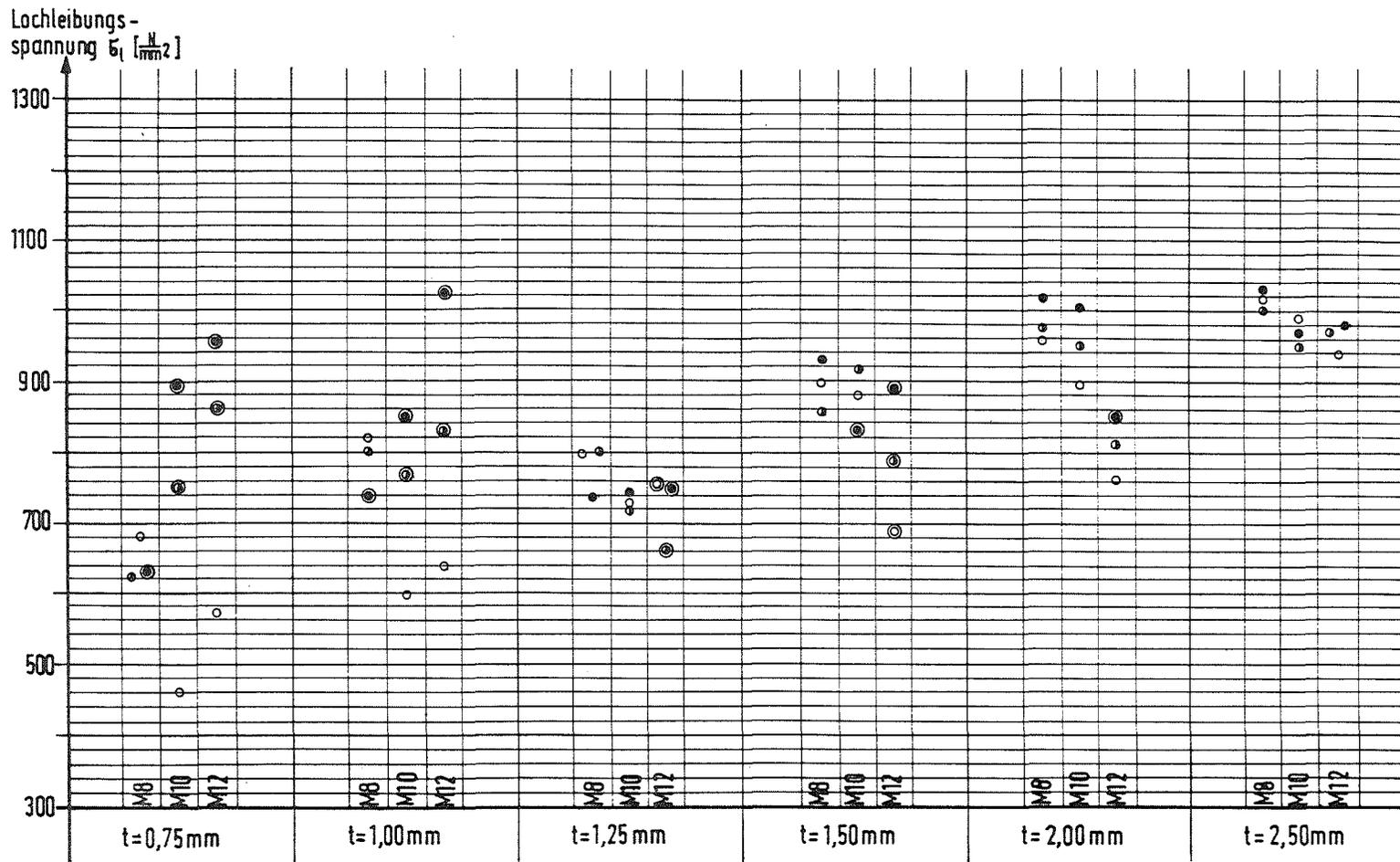
Der kleinste Bemessungswert für Schrauben mit **halber** Vorspannung ergibt bei  $t = 0,75 \text{ mm}$   $\sigma_1 = 349 \text{ N/mm}^2$  und bei  $t = 1,25 \text{ mm}$  beträgt die ermittelte Lochleibungsspannung  $\sigma_1 = 354 \text{ N/mm}^2$ . Bei  $t = 2,5 \text{ mm}$  steigt die Lochleibungsspannung auf  $\sigma_1 = 472 \text{ N/mm}^2$  an und ist sogar geringfügig kleiner als bei den rohen Schrauben.

Für die Schrauben mit **voller** Vorspannung errechnet sich der kleinste Wert bei  $t = 1,25 \text{ mm}$  mit  $\sigma_1 = 382 \text{ N/mm}^2$  und bei  $t = 2,5 \text{ mm}$  beträgt  $\sigma_1 = 507 \text{ N/mm}^2$ . Besonders groß ist die Bandbreite zwischen dem unteren und oberen Bemessungswert bei den dünneren Blechen. Bei  $t = 0,75 \text{ mm}$  beträgt  $\Delta\sigma_1 = 189 \text{ N/mm}^2$ .



○ Schrauben ohne Vorspannung   • Schrauben mit halber Vorspannung   • Schrauben mit voller Vorspannung   ⊙ Traglast vor dem Verschiebungsweg von 10mm erreicht

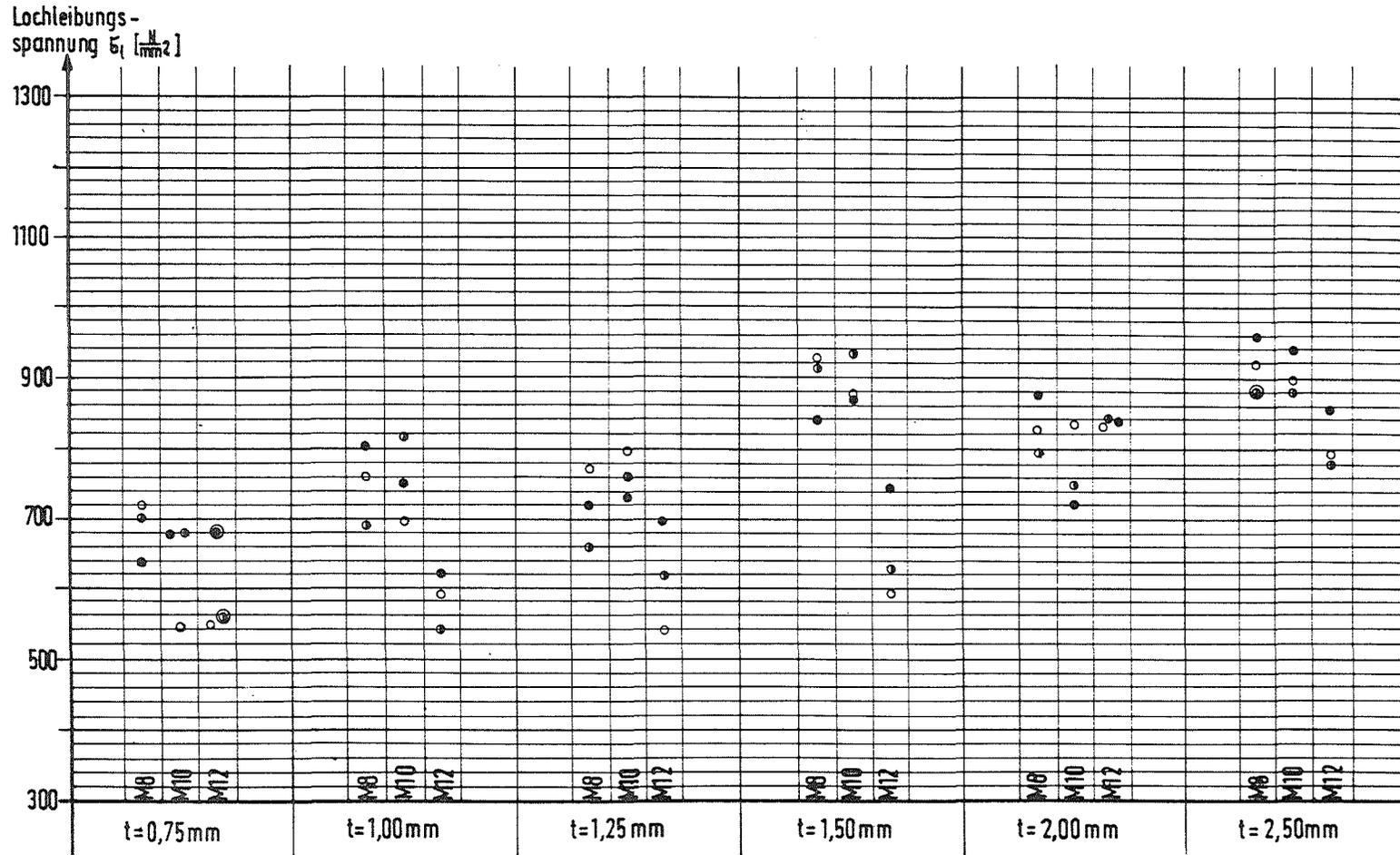
Abb. 5.32  
 Auf ST 37-2 bezogene Lochleibungsspannung der aluminieren Bleche  
 bei einem Verschiebungsweg von 10mm (Mittelwert aus 3 Versuchen bei langsam aufgebrachter Last)



○ Schrauben ohne Vorspannung   • Schrauben mit halber Vorspannung   • Schrauben mit voller Vorspannung   ⊙ Traglast vor dem Verschiebungsweg von 10mm erreicht

Abb. 5.33

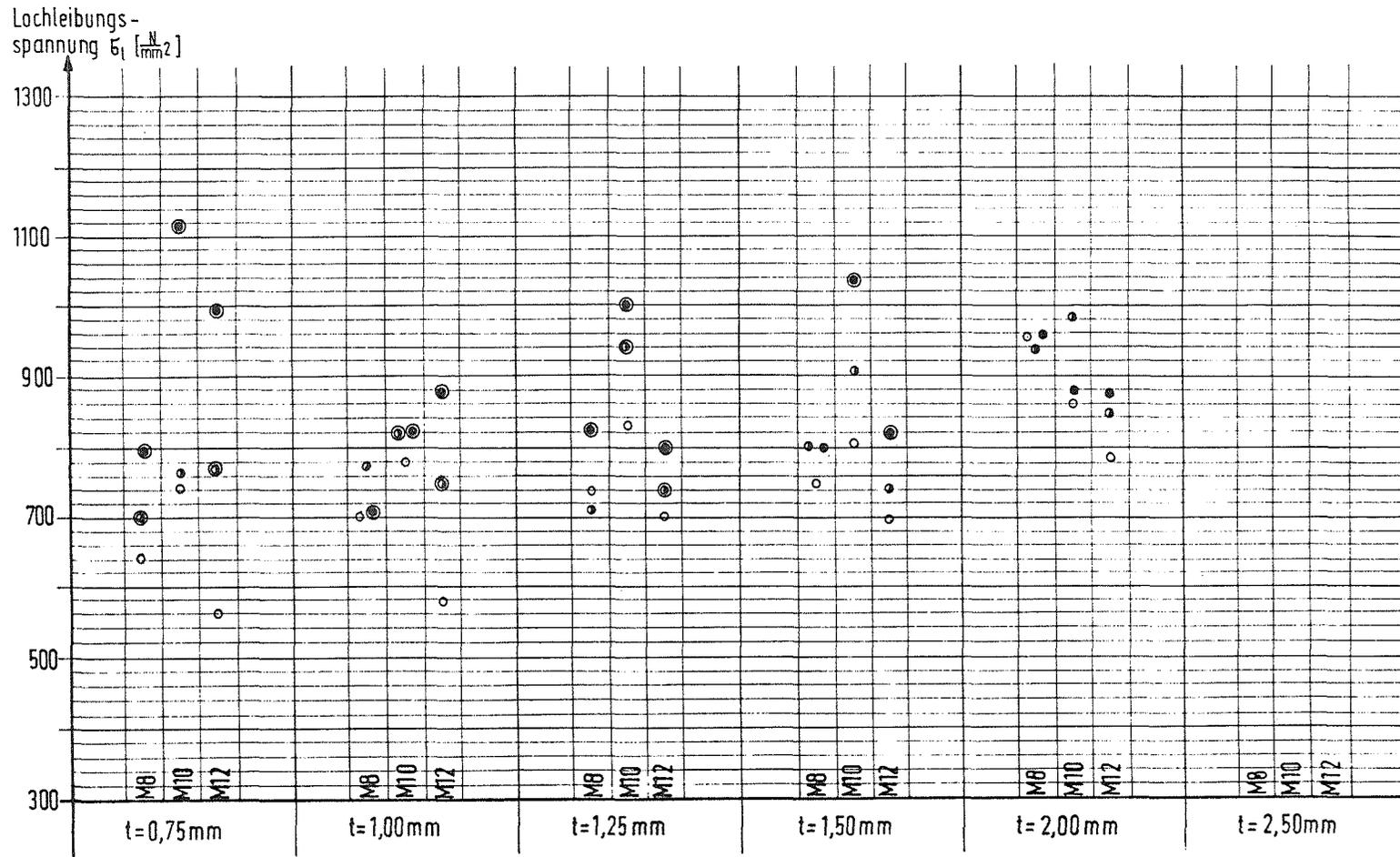
Auf ST 37-2 bezogene Lochleibungsspannung der verzinkten Bleche bei einem Verschiebungsweg von 10mm (Mittelwert aus 3 Versuchen bei langsam aufgebrachter Last)



○ Schrauben ohne Vorspannung   • Schrauben mit halber Vorspannung   • Schrauben mit voller Vorspannung   ⊙ Traglast vor dem Verschiebungsweg von 10mm erreicht

Abb. 5.34

Auf ST 37-2 bezogene Lochleibungsspannung der kunststoffbeschichteten Bleche bei einem Verschiebungsweg von 10mm (Mittelwert aus 3 Versuchen bei langsam aufgebrachtter Last)



○ Schrauben ohne Vorspannung   • Schrauben mit halber Vorspannung   • Schrauben mit voller Vorspannung   ⊙ Traglast vor dem Verschiebungsweg von 10mm erreicht

Abb. 5.35

Auf ST 37-2 bezogene Lochleibungsspannung der emaillierten Bleche bei einem Verschiebungsweg von 10mm (Mittelwert aus 3 Versuchen bei langsam aufgebrachter Last)

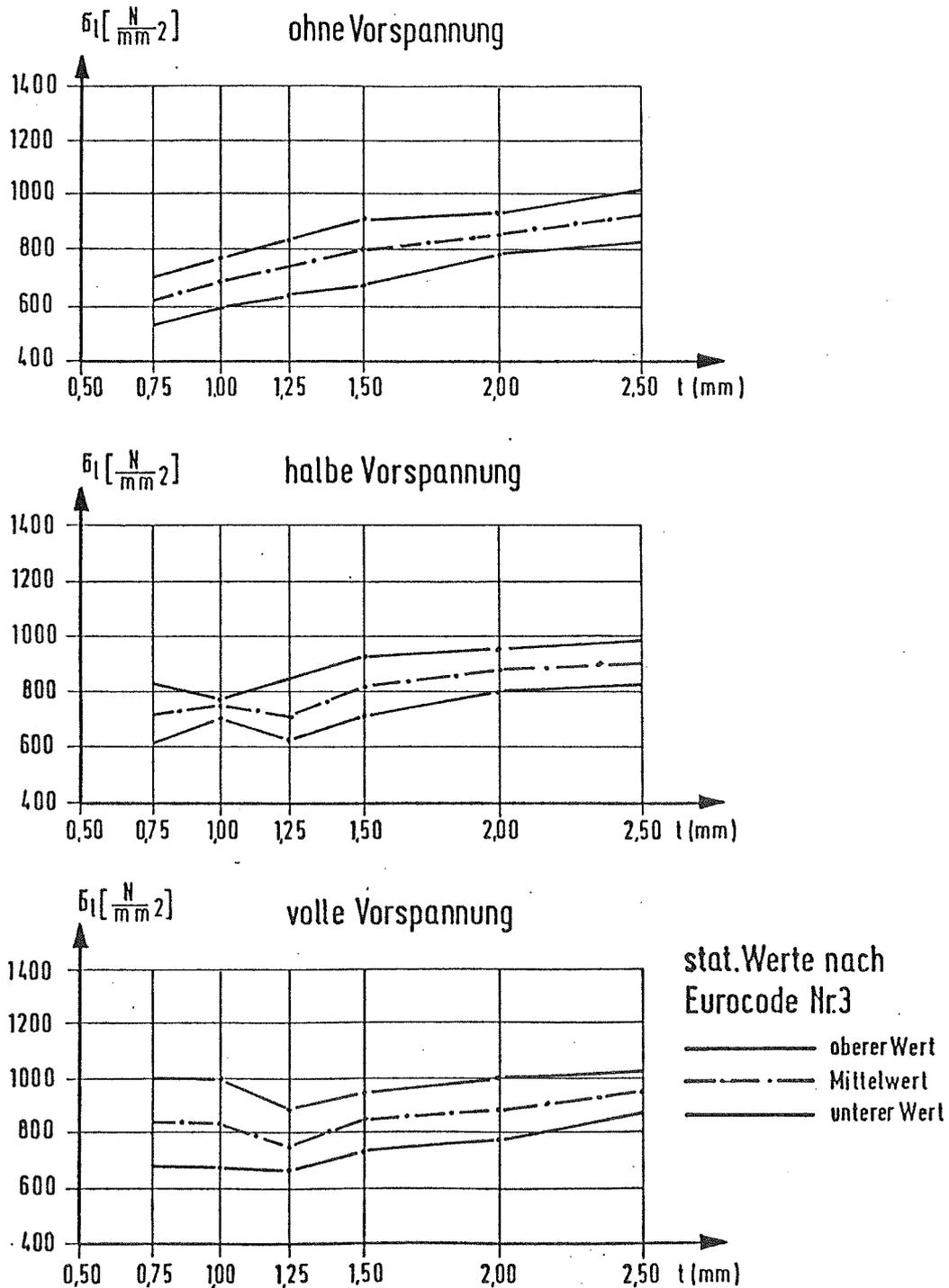


Abb. 5.36

Auf St 37-2 bezogene Lochleibungsspannungen der Al, ZN, K, EM-Bleche bei einem Verschiebungsweg von 10mm (bei langsam aufgebrachter Last)

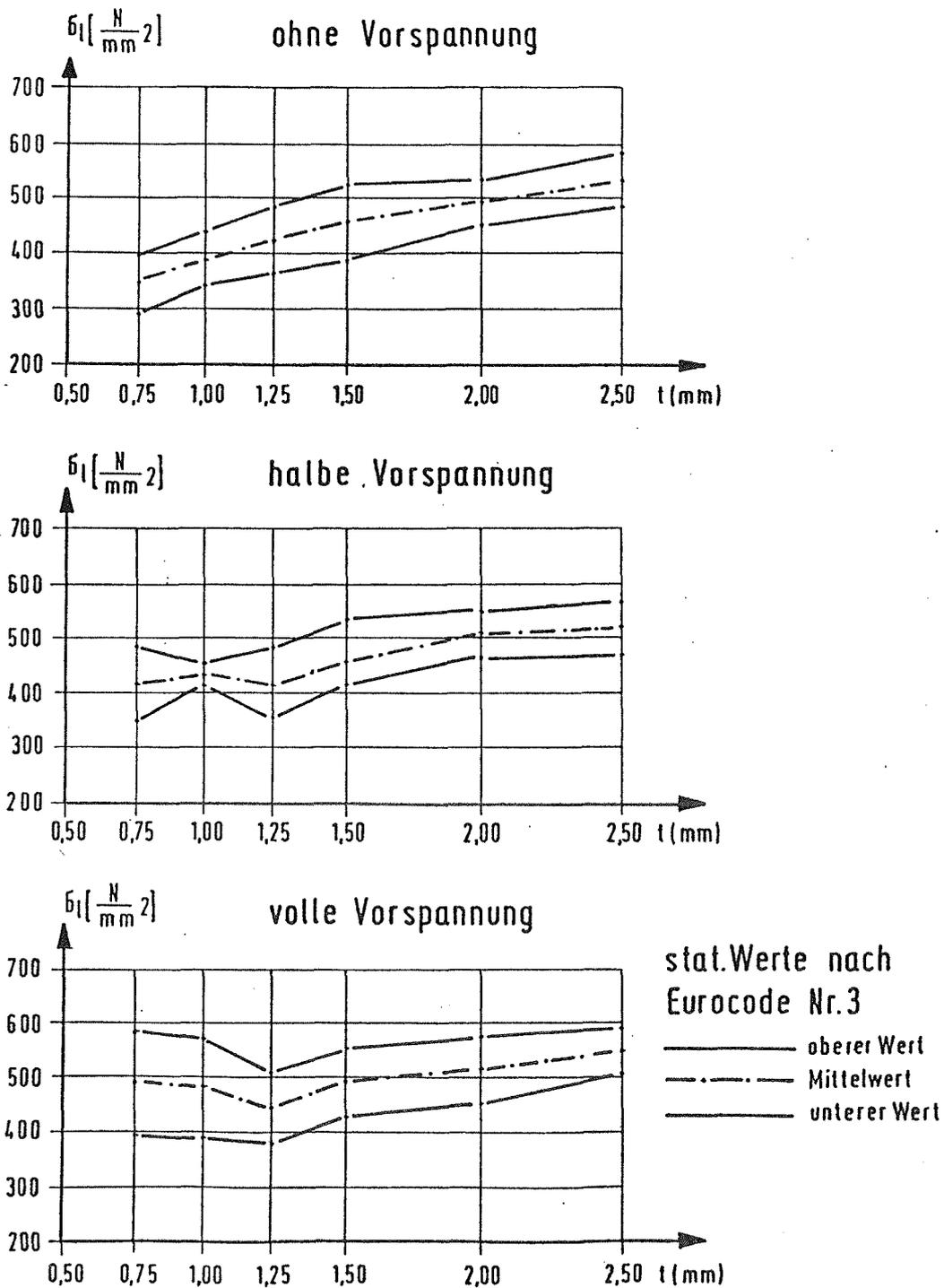


Abb. 5.37

Auf St 37-2 bezogene zulässige Lochleibungsspannung der Al, Zn, K, EM- Bleche bei einem Verschiebungsweg von 10mm (Sicherheit  $\gamma=1,75$  - bei langsam aufgebrachter Last)

### 5.7 Auf St 37-2 bezogene Lochleibungsspannungen bei einem Verschiebungsweg von 5 mm und langsam aufgebrachtter Last.

In den Abb. 5.38 bis 5.41 sind die Lochleibungsspannungen für die vier Blechgruppen angegeben. Die Lochleibungsspannungen der Bleche, bei denen die Tragfähigkeit schon vor dem Erreichen eines Verschiebungsweges von 5 mm überschritten war, sind durch einen Doppelkreis gekennzeichnet.

Allgemein läßt sich feststellen, daß nur bei den mit halber und voller Spannkraft vorgespannten Schraubverbindungen die Tragfähigkeit eher erreicht wird. Auch wurden für die vorgespannten Schrauben höhere Lochleibungsspannungen bei dem Verschiebungsweg gemessen. Jedoch treffen die beiden oben genannten Feststellungen nicht für alle Versuchskörper zu.

Die kleinste Lochleibungsspannung wurde bei den verzinkten Blechen  $t = 0,75$  mm für die nicht vorgespannte Schraubverbindung M 10 gemessen. Hier betrug die Lochleibungsspannung  $\sigma_1 = 400$  N/mm<sup>2</sup>, vgl. Abb. 5.39. Die größte Lochleibungsspannung ergab das emaillierte Blech  $t = 0,75$  mm. Für die voll vorgespannte Schraubverbindung M 10 wurde  $\sigma_1 = 1110$  N/mm<sup>2</sup> gemessen.

In Abb. 5.42 sind die Ergebnisse der statistischen Auswertung dargestellt. Es ist eindeutig, daß die halbe und volle Vorspannung der Schrauben bei den dünnen Blechen  $t \leq 1,50$  mm günstigere Bedingungen schafft. Bei der Blechdicke  $t = 2,5$  mm sind kaum Unterschiede der Lochleibungsspannungen für die verschiedenen Vorspanngrade feststellbar. Für die Blechdicke  $t = 0,75$  mm beträgt z. B. die Lochleibungsspannung des mittleren Bemessungswertes ohne Vorspannung  $\sigma_1 = 552$  N/mm<sup>2</sup>, bei halber Vorspannung  $\sigma_1 = 709$  N/mm<sup>2</sup> und bei voller Vorspannung  $\sigma_1 = 848$  N/mm<sup>2</sup>.

Dahingegen ergibt die Blechdicke  $t = 2,5$  mm ohne Vorspannung  $\bar{\sigma}_1 = 750$  N/mm<sup>2</sup>, bei halber Vorspannkraft  $\bar{\sigma}_1 = 766$  N/mm<sup>2</sup> und bei voller Vorspannkraft  $\bar{\sigma}_1 = 807$  N/mm<sup>2</sup>.

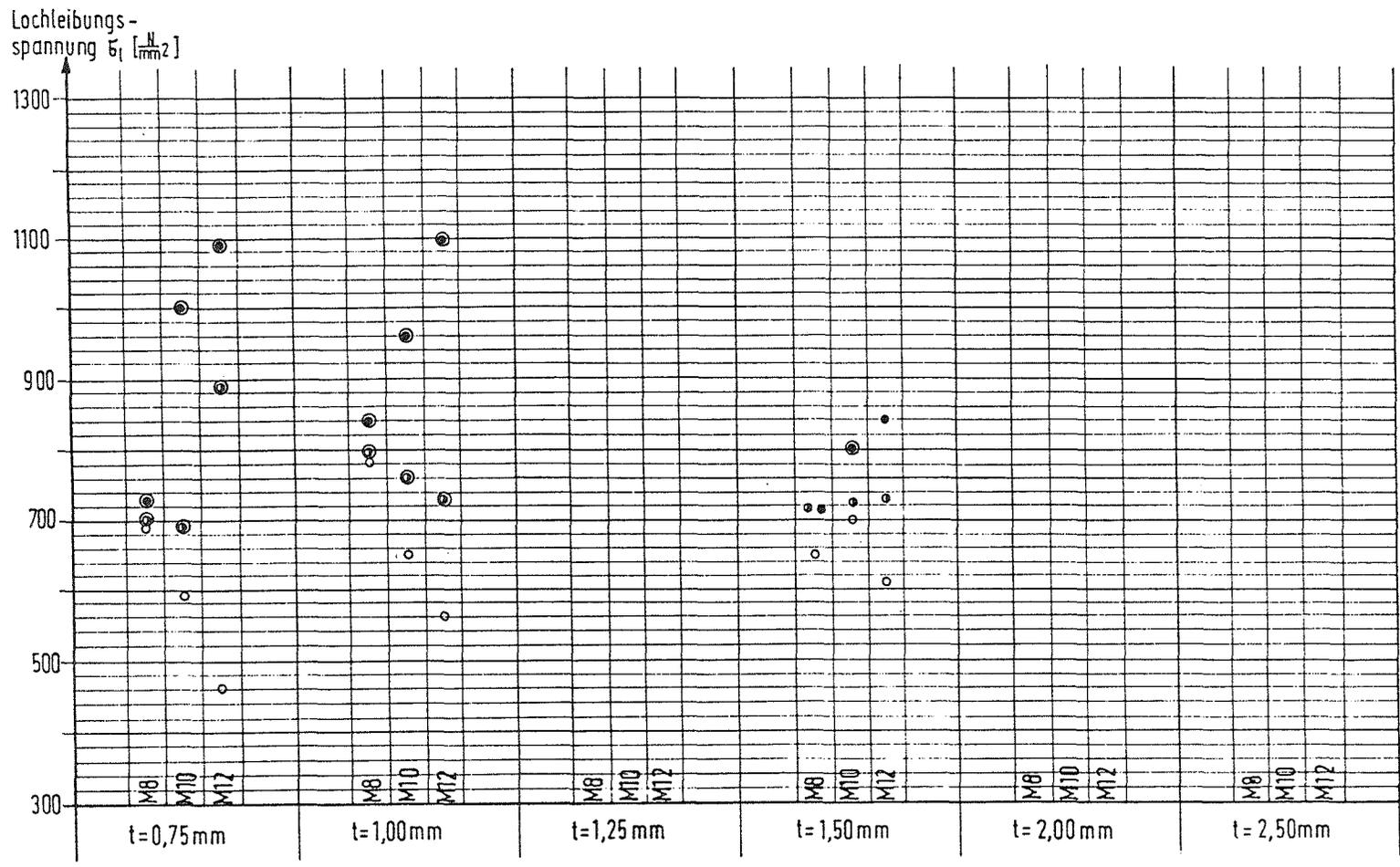
Bei 5 mm Verschiebungsweg wird ein Sicherheitsbeiwert  $\gamma = 1,5$  gewählt. Die sich hiermit ergebenden zulässigen Lochleibungsspannungen sind in Abb. 5.43 dargestellt.

Für die Schrauben **ohne** Vorspannung beträgt die so ermittelte kleinste Lochleibungsspannung für den unteren Bemessungswert bei  $t = 0,75$  mm  $\bar{\sigma}_1 = 302$  N/mm<sup>2</sup> und steigt bei zunehmender Blechdicke bei  $t = 2,5$  mm auf  $\bar{\sigma}_1 = 447$  N/mm<sup>2</sup> an.

Die kleinsten Lochleibungsspannungen der Schraubverbindungen mit **halber** Vorspannung betragen bei  $t = 1,25$  mm  $\bar{\sigma}_1 = 391$  N/mm<sup>2</sup>. Der Anstieg der Lochleibungsspannung mit zunehmender Blechdicke fällt geringer aus und beträgt bei  $t = 2,5$  mm  $\bar{\sigma}_1 = 465$  N/mm<sup>2</sup>. Besonders groß ist die Bandbreite zwischen den unteren und oberen Meßwert bei den Blechdicken  $t = 0,75$  mm bis 1,5 mm. Bei  $t = 1,25$  mm beträgt  $\Delta\bar{\sigma}_1 = 174$  N/mm<sup>2</sup>.

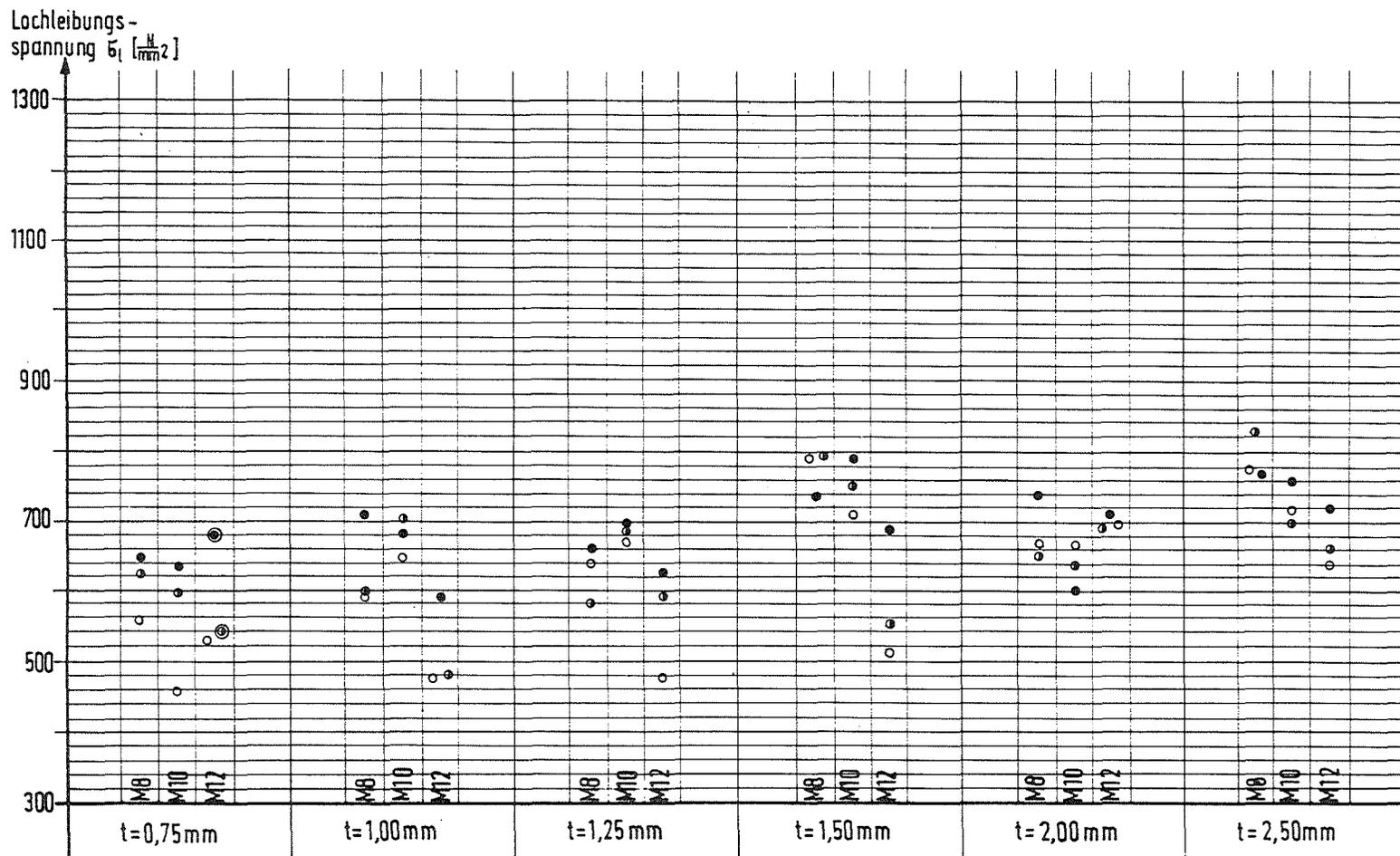
Die Schrauben mit **voller** Vorspannung liefern über alle Blechdicken einen annähernd konstanten Verlauf der Lochleibungsspannung, jedoch ergibt sich aufgrund der starken Streuung der Meßwerte eine besonders breite Bandbreite zwischen dem oberen und unteren Meßwert.

Der kleinste Meßwert bei  $t = 1,25$  mm beträgt  $\bar{\sigma}_1 = 419$  N/mm<sup>2</sup> und die größte Bandbreite bei  $t = 0,75$  mm  $\Delta\bar{\sigma}_1 = 219$  N/mm<sup>2</sup>.



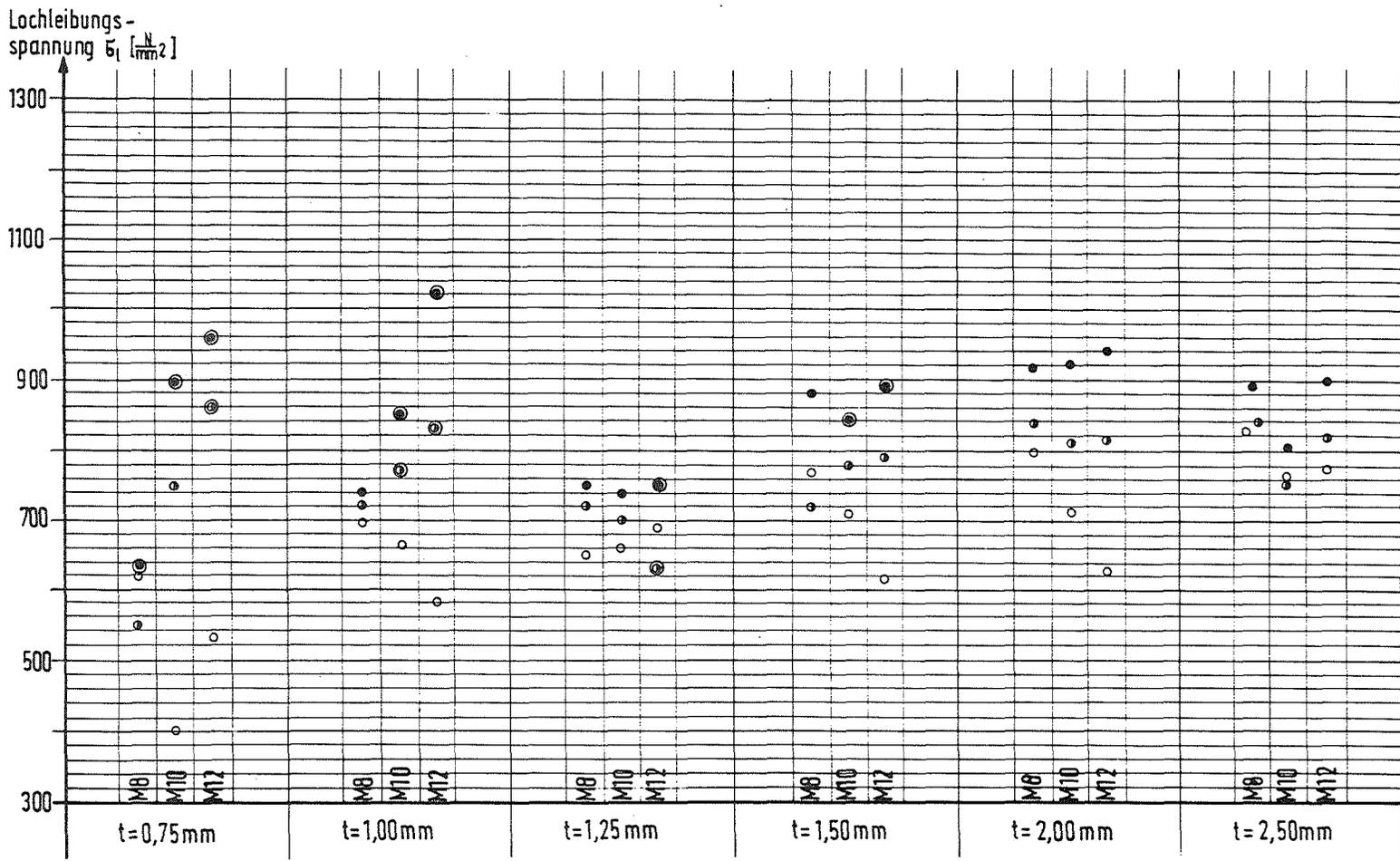
○ Schrauben ohne Vorspannung   • Schrauben mit halber Vorspannung   • Schrauben mit voller Vorspannung   ⊙ Traglast vor dem Verschiebungsweg von 5mm erreicht

**Abb. 5.38**  
 Auf ST 37-2 bezogene Lochleibungsspannung der aluminieren Bleche  
 bei einem Verschiebungsweg von 5 mm (Mittelwert aus 3 Versuchen bei langsam aufgebracht Last)



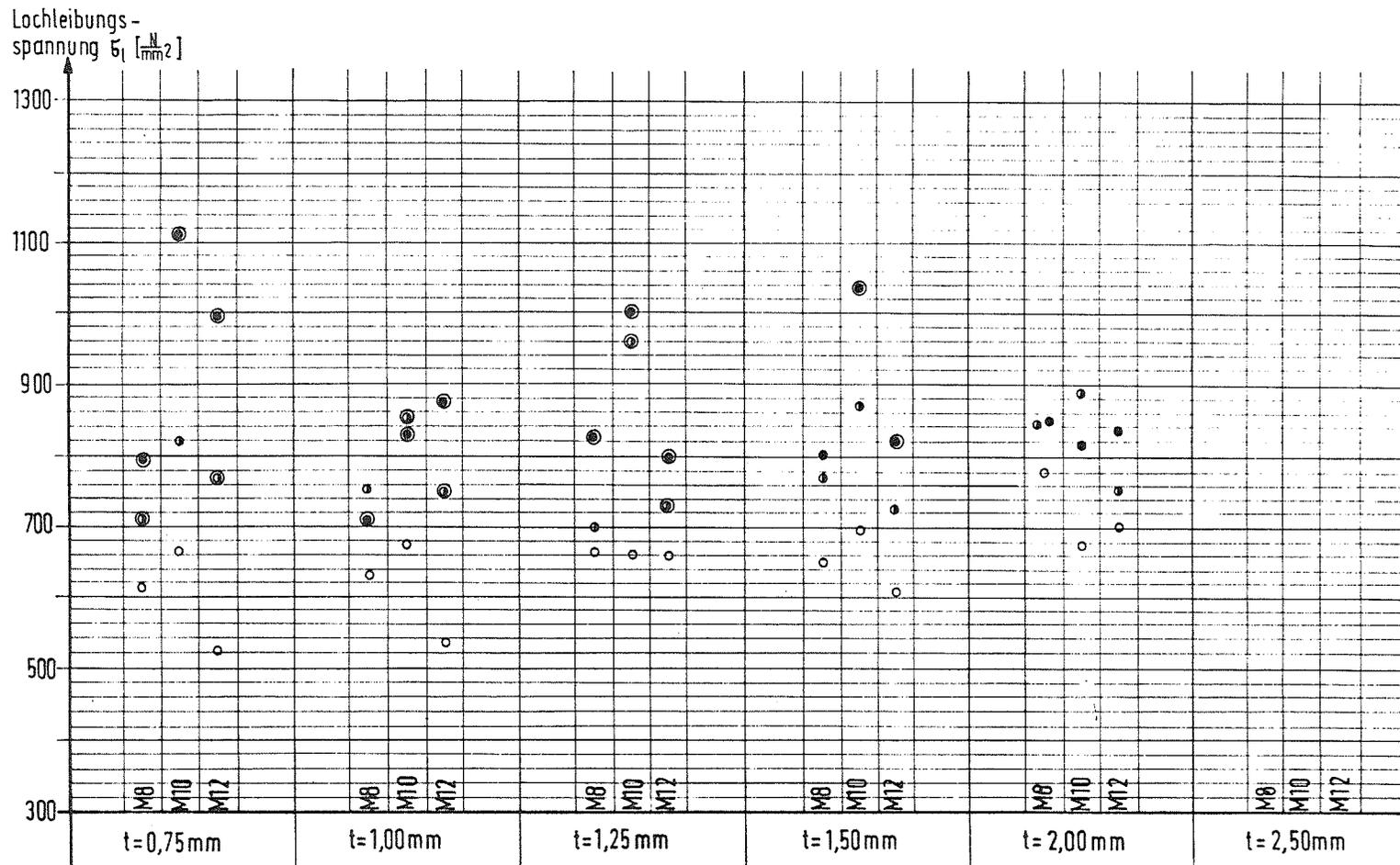
○ Schrauben ohne Vorspannung    ● Schrauben mit halber Vorspannung    ● Schrauben mit voller Vorspannung    ⊙ Traglast vor dem Verschiebungsweg von 5mm erreicht

**Abb. 5.40**  
**Auf ST 37-2 bezogene Lochleibungsspannung der kunststoffbeschichteten Bleche**  
**bei einem Verschiebungsweg von 5 mm (Mittelwert aus 3 Versuchen bei langsam aufgebrachtener Last)**



○ Schrauben ohne Vorspannung   • Schrauben mit halber Vorspannung   • Schrauben mit voller Vorspannung   ⊙ Traglast vor dem Verschiebungsweg von 5mm erreicht

**Abb. 5.39**  
**Auf ST 37-2 bezogene Lochleibungsspannung der verzinkten Bleche**  
**bei einem Verschiebungsweg von 5 mm (Mittelwert aus 3 Versuchen bei langsam aufgebrachtter Last)**



○ Schrauben ohne Vorspannung   ● Schrauben mit halber Vorspannung   ● Schrauben mit voller Vorspannung   ⊙ Traglast vor dem Verschiebungsweg von 5mm erreicht

**Abb. 5.41**  
 Auf ST 37-2 bezogene Lochleibungsspannung der emaillierten Bleche  
 bei einem Verschiebungsweg von 5 mm (Mittelwert aus 3 Versuchen bei langsam aufgebrachter Last)

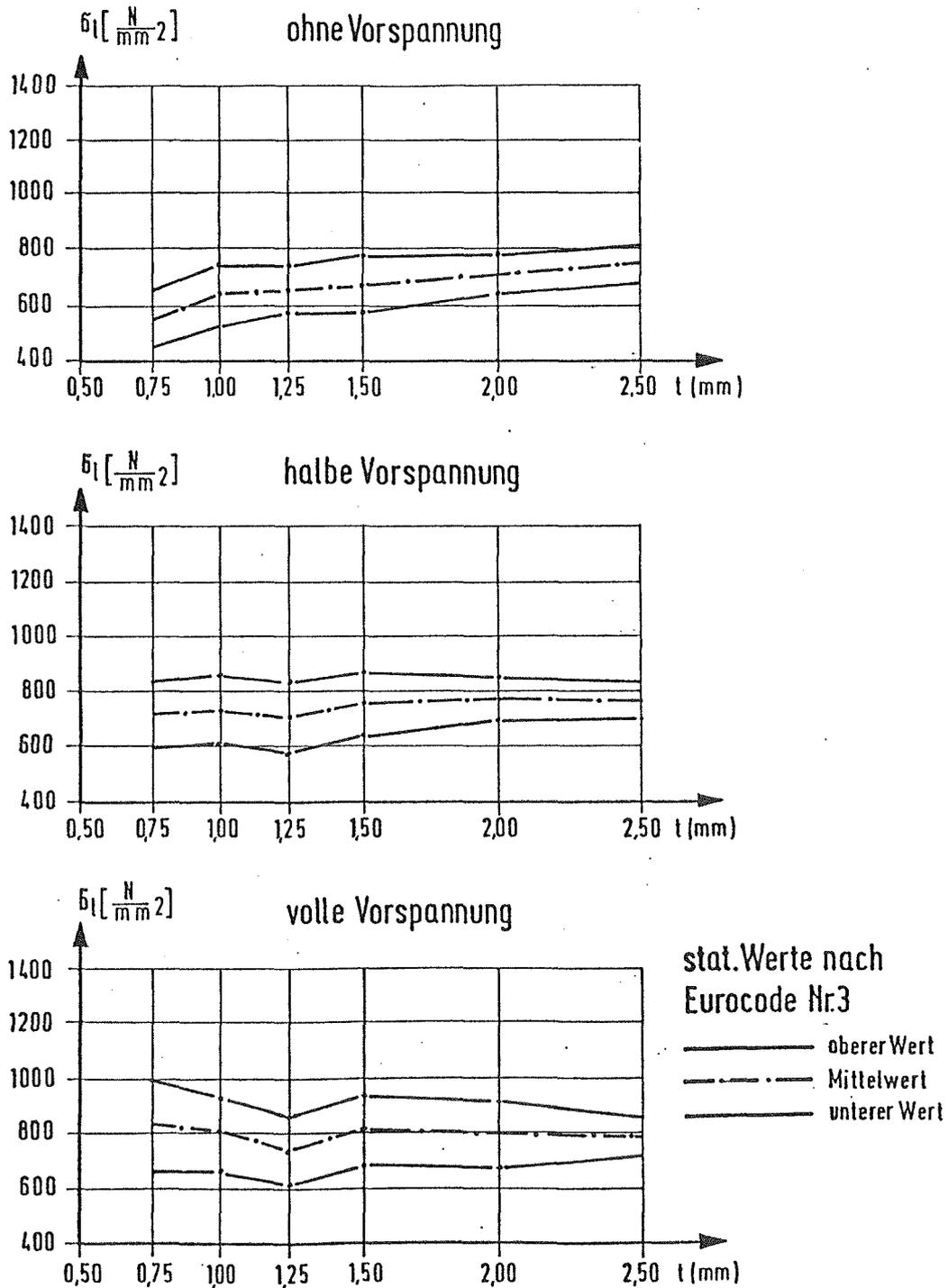


Abb. 5.42

Auf St 37-2 bezogene Lochleibungsspannungen der Al, Zn, K, EM-Bleche bei einem Verschiebungsweg von 5mm (bei langsam aufgebrachtter Last)

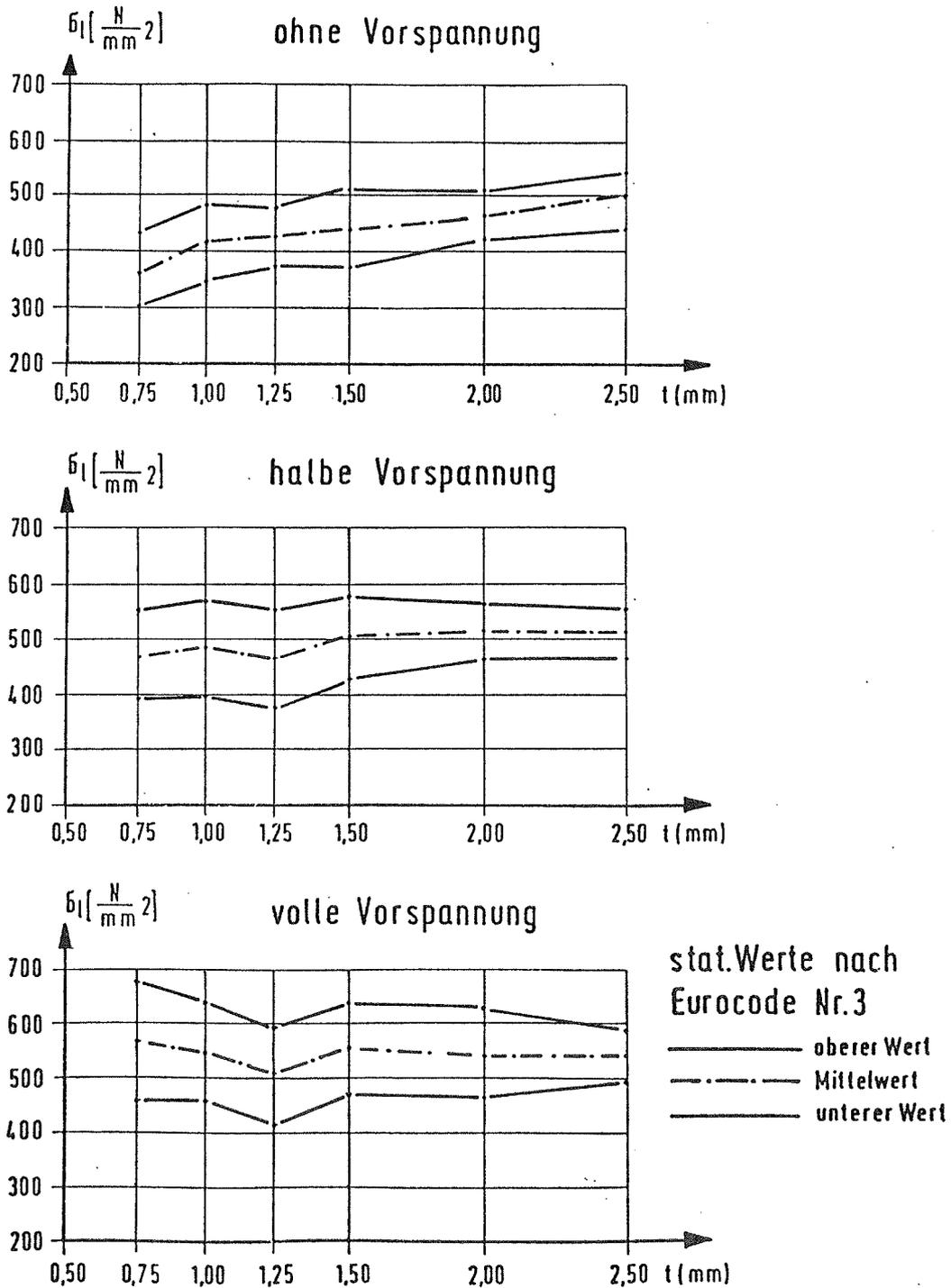


Abb. 5.43

Auf St37-2 bezogene zulässige Lochleibungsspannung der Al,Zn,K, EM-Bleche bei einem Verschiebungsweg von 5 mm (Sicherheit  $\gamma=1,5$  - bei langsam aufgebrachter Last)

## 5.8 Gemessene Lochleibungsspannung für emaillierte Bleche

### 5.8.1 Lochleibungsspannungen bei der die Bleche zu klaffen beginnen

In Abb. 5.44 sind die Lochleibungsspannungen angegeben, die bei zügiger Lastaufbringung gemessen wurden, wenn die beiden Bleche der Versuchskörper auseinanderklafften, d. h. die Fuge zwischen den beiden Blechen sich durch einen deutlich sichtbaren Spalt öffnete. Die mit dem Abminderungsfaktor  $a_D$  multiplizierten Lochleibungsspannungen der zügigen Lastaufbringung sind in Abb. 5.45 dargestellt und ergeben die Lochleibungsspannungen bei Dauerbelastung.

Eine weitere Auswertung erfolgte nur für die langsam aufgebrachte Last. In Abb. 5.46 sind die Ergebnisse der statistischen Auswertung aufgetragen. Die mittleren Lochleibungsspannungen der Schraubverbindungen ohne Vorspannung liegen etwa um  $\bar{\sigma}_1 = 550 \text{ N/mm}^2$ , während die der Schraubverbindungen mit halber und mit voller Vorspannkraft annähernd gleich groß sind und etwa  $\bar{\sigma}_1 = 620 \text{ N/mm}^2$  ergeben. Für die Bleche  $t = 1,50 \text{ mm}$  und  $t = 2,00 \text{ mm}$  wurden die größten Schwankungen der Lochleibungsspannungen gemessen. Die Spannbreite beträgt für alle Schraubverbindungen etwa  $\Delta\sigma_1 \pm 100 \text{ N/mm}^2$  über oder unter dem Mittelwert.

Die durch den Sicherheitsbeiwert  $\gamma = 1,5$  dividierten gemessenen Lochleibungsspannungen sind in Abb. 5.47 aufgetragen. Es fällt auf, daß für die Schraubverbindungen ohne Vorspannung und mit halber Vorspannung, bei den Blechdicken  $t = 0,75 \text{ mm}$  bis  $t = 1,25 \text{ mm}$ , die Streubreite der Meßergebnisse geringer ist als bei den dickeren Blechen. Auch errechnet sich für diese Bleche teilweise ein günstigerer unterer und mittlerer Bemessungswert für die Lochleibungsspannungen.

Für die Schrauben **ohne** Vorspannung beträgt die kleinste Lochleibungsspannung bei  $t = 1,5 \text{ mm}$   $\sigma_1 = 266 \text{ N/mm}^2$  und die Bandbreite beträgt hier für  $\Delta\sigma_1 = 125 \text{ N/mm}^2$ .

Ebenfalls bei der Blechdicke  $t = 1,50 \text{ mm}$  ergeben sich für die Schrauben mit **halber** Vorspannung die kleinsten Lochleibungsspannungen mit  $\sigma_1 = 315 \text{ N/mm}^2$ .

Einen annähernd konstanten Verlauf der Lochleibungsspannungen über alle Blechdicken ergeben sich für die Schraubverbindungen mit **voller** Vorspannung. Der kleinste Bemessungswert beträgt bei  $t = 0,75 \text{ mm}$   $\sigma_1 = 356 \text{ N/mm}^2$ . Die größte Bandbreite zwischen dem unteren und oberen Bemessungswert errechnet sich bei  $t = 2,0 \text{ mm}$  mit  $\Delta\sigma_1 = 110 \text{ N/mm}^2$ .

### 5.8.2 Lochleibungsspannungen bei der die Emaillie abplatzt

Die Meßergebnisse der Lochleibungsspannung, bei der die Emaillie im Bereich der Schraubenköpfe und Muttern bei zügig aufgebrachter Last absplittert, sind in Abb. 5.48 dargestellt.

In Abb. 5.49 sind die bei langsamer Lastaufbringung auftretenden Lochleibungsspannungen aufgetragen. Die größte und kleinste Lochleibungsspannung wurde jeweils für die Blechdicke  $t = 0,75 \text{ mm}$  gemessen. Bei voller Vorspannung ergab sich bei der Schraubverbindung M 10 die größte Spannung mit  $\sigma_1 = 820 \text{ N/mm}^2$ . Die kleinste Lochleibungsspannung betrug  $\sigma_1 = 355 \text{ N/mm}^2$  für die Schrauben M 12 ohne Vorspannung.

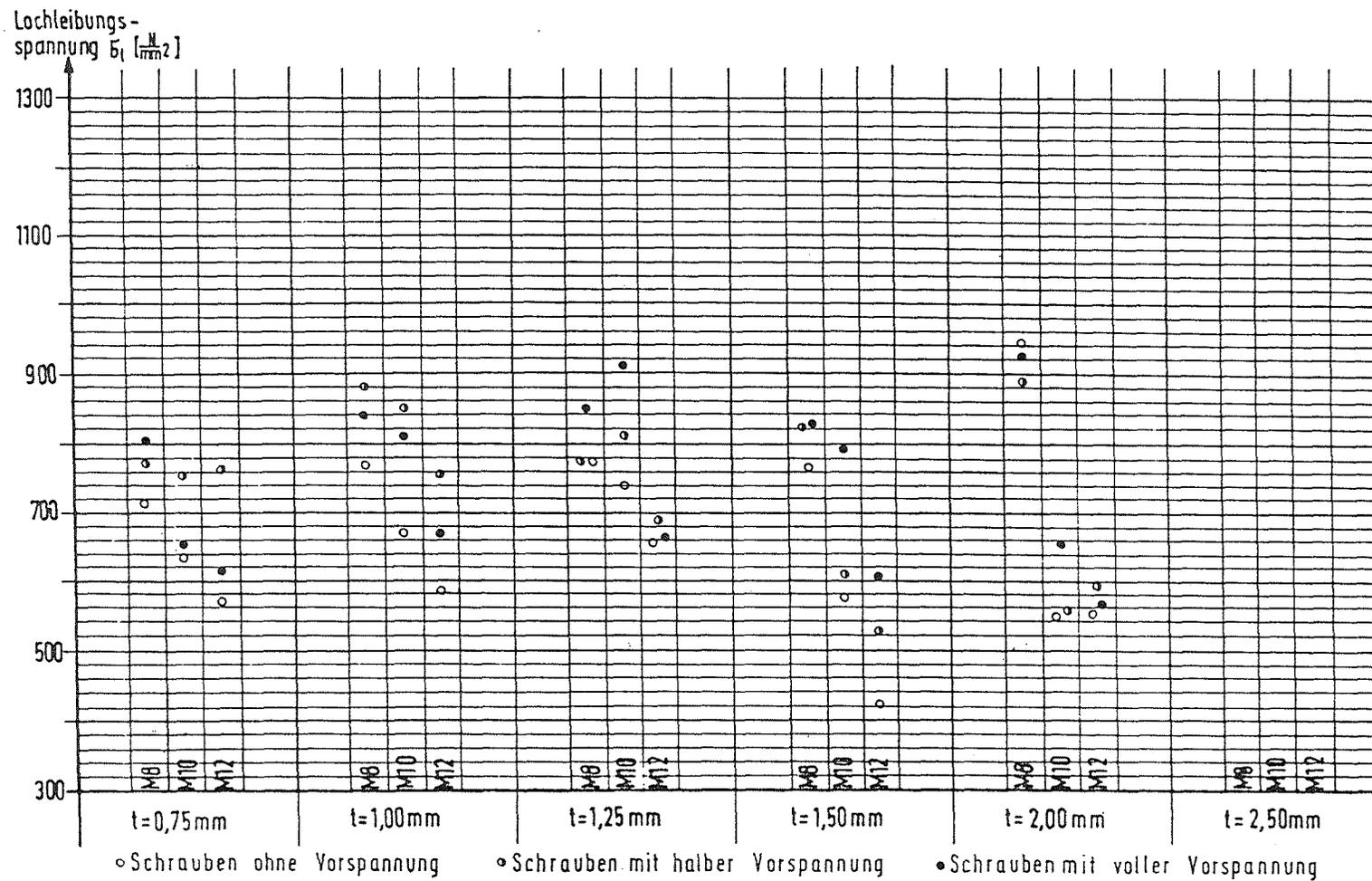


Abb. 5.44

Gemessene Lochleibungsspannung der emaillierten Bleche  
 bei der die Bleche zu klaffen beginnen (Mittelwert aus 3 Versuchen bei zügig aufgebrachtener Last)

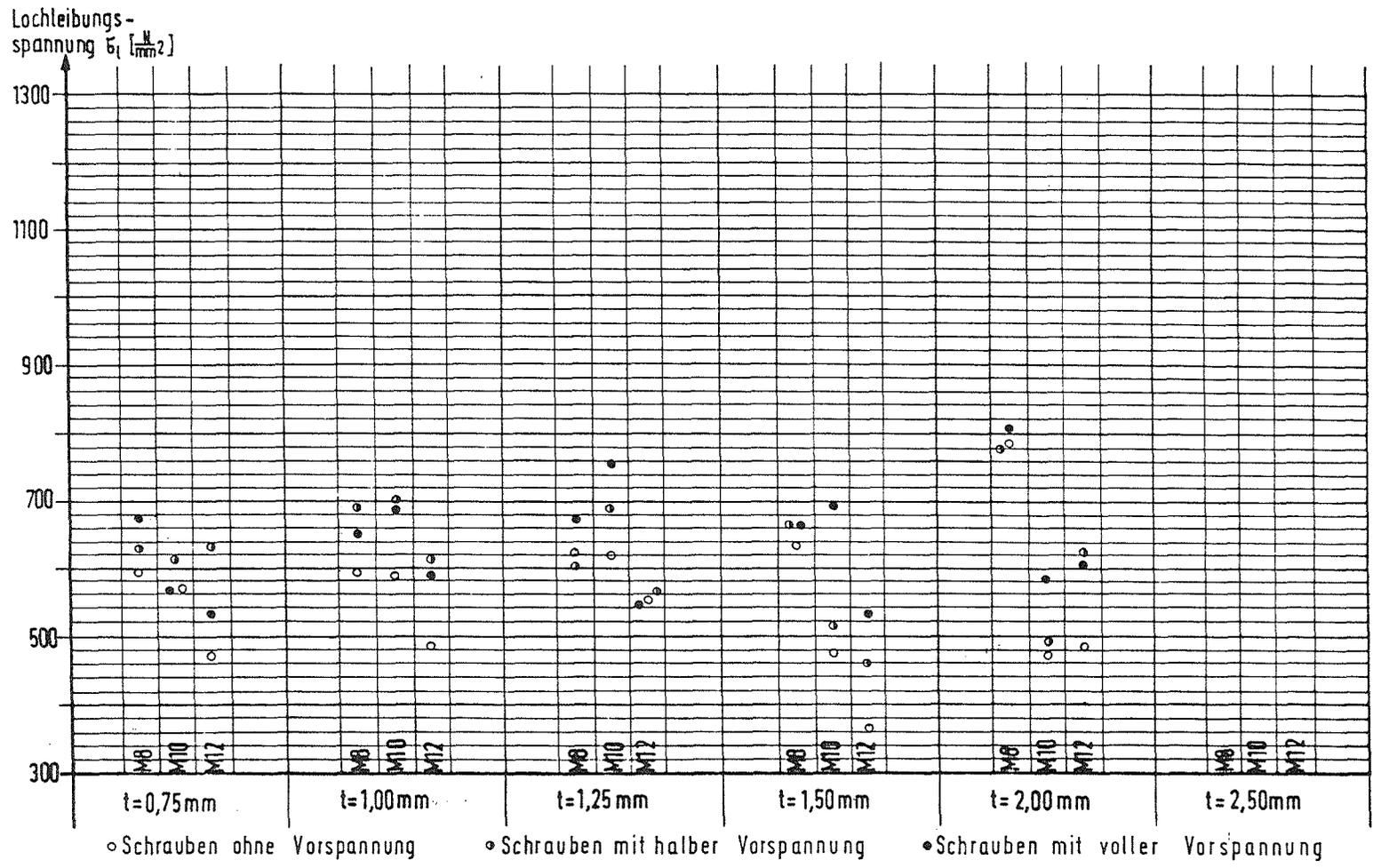


Abb. 5.45  
Gemessene Lochleibungsspannung der emaillierten Bleche  
bei der die Bleche zu klaffen beginnen (Mittelwert aus 3 Versuchen bei langsam aufgebrachtter Last)

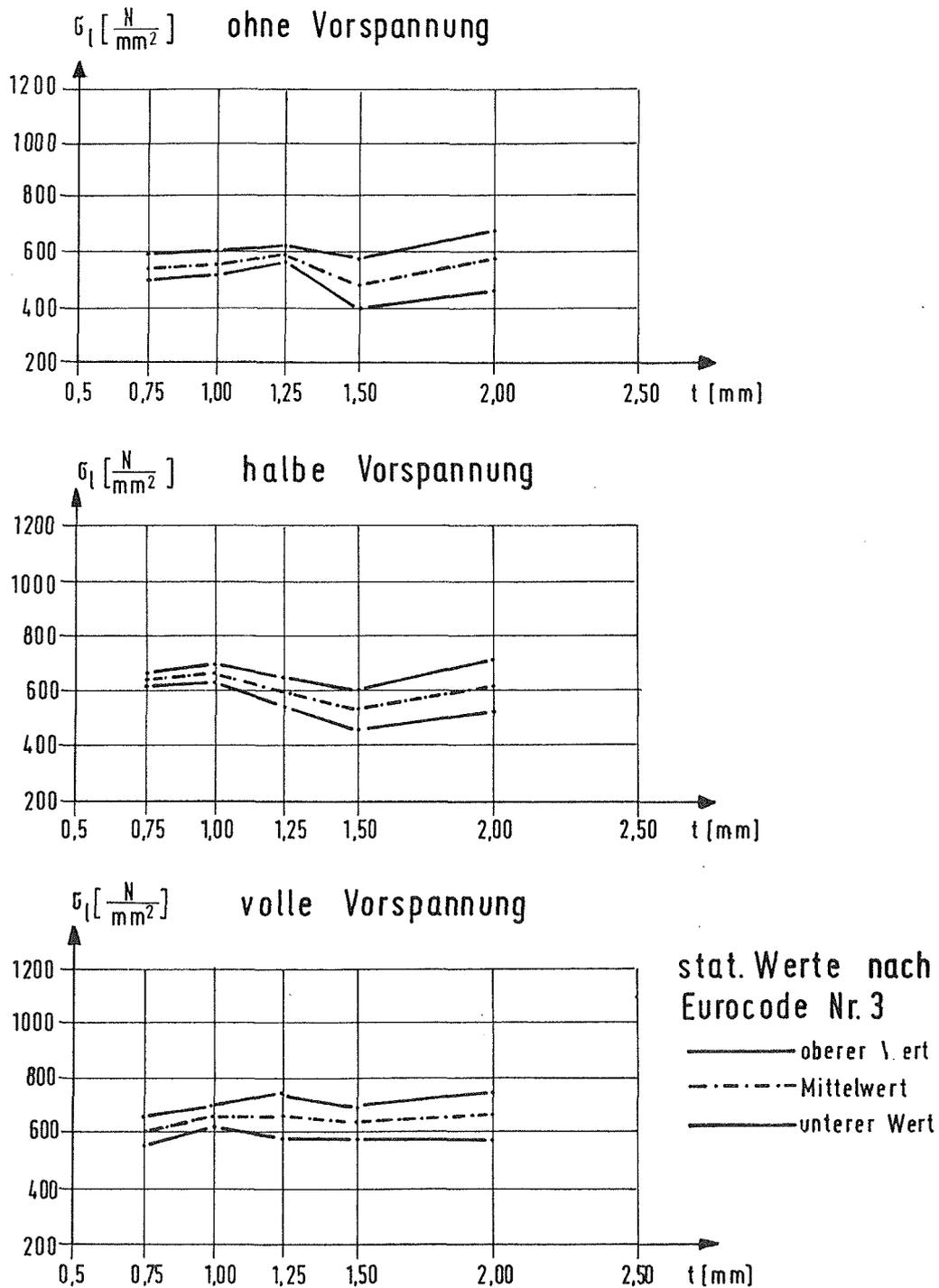


Abb. 5.46

Gemessene Lochleibungsspannung der emaillierten Bleche bei der die Bleche zu klaffen beginnen (bei langsam aufgebrachtter Last)

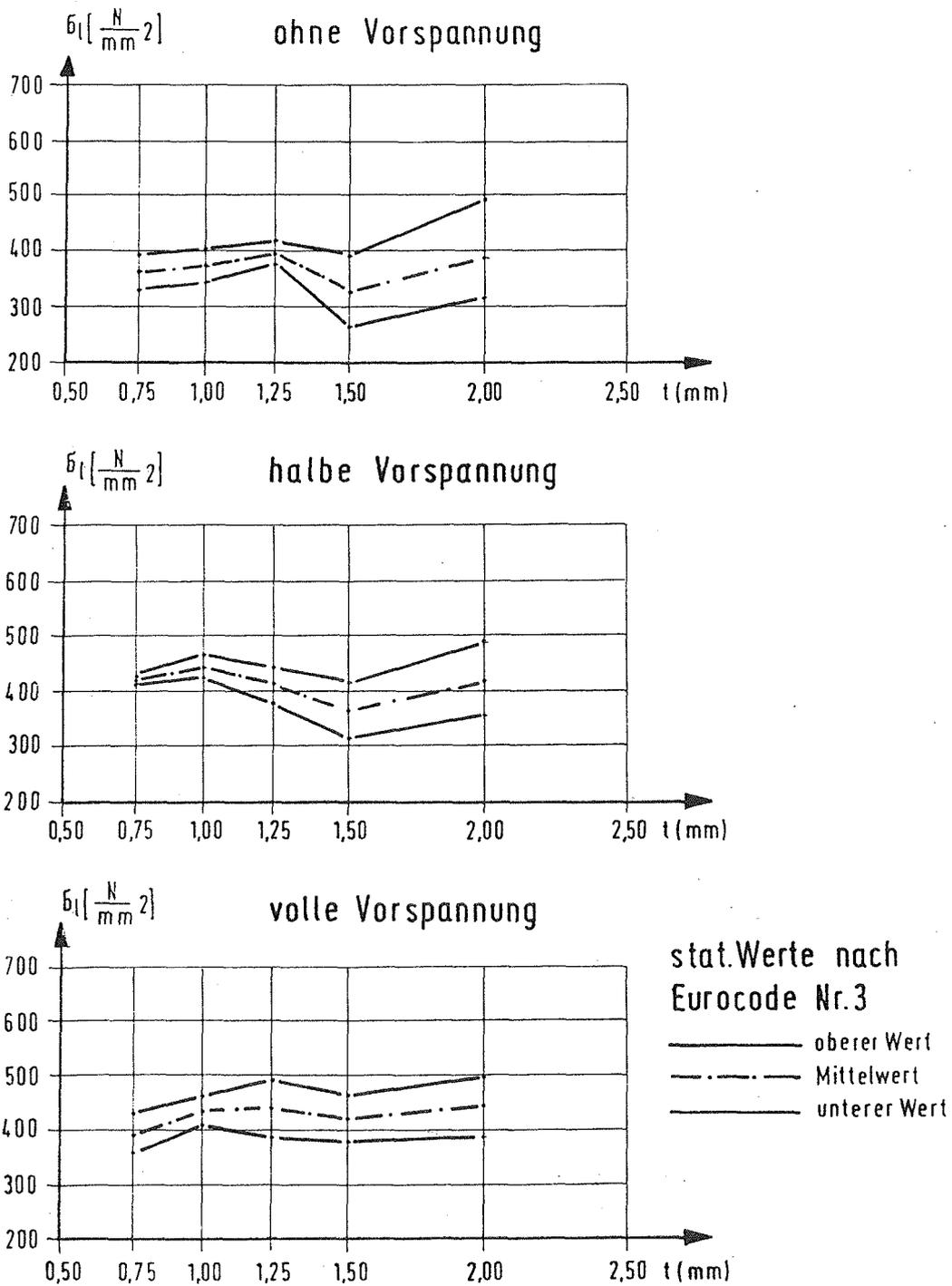


Abb. 5.47

Zulässige Lochleibungsspannung der emaillierten Bleche, bei der die Bleche zu klaffen beginnen (Sicherheit  $\gamma=1,5$  - bei langsam aufgebrachter Last)

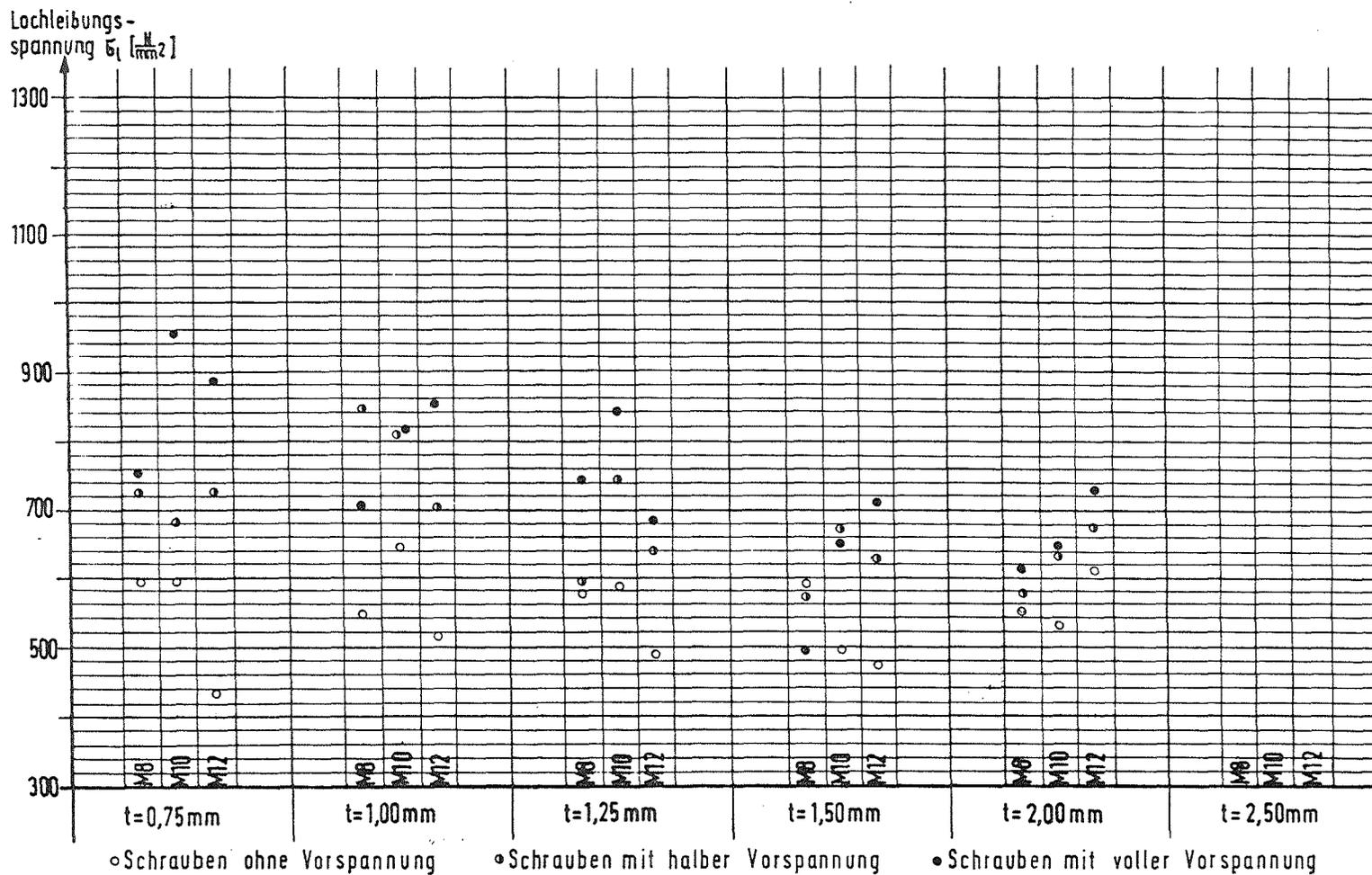


Abb. 5.48

Gemessene Lochleibungsspannung der emaillierten Bleche

bei der die Emaillie abplatzt (Mittelwert aus 3 Versuchen bei zügig aufgebrachter Last)

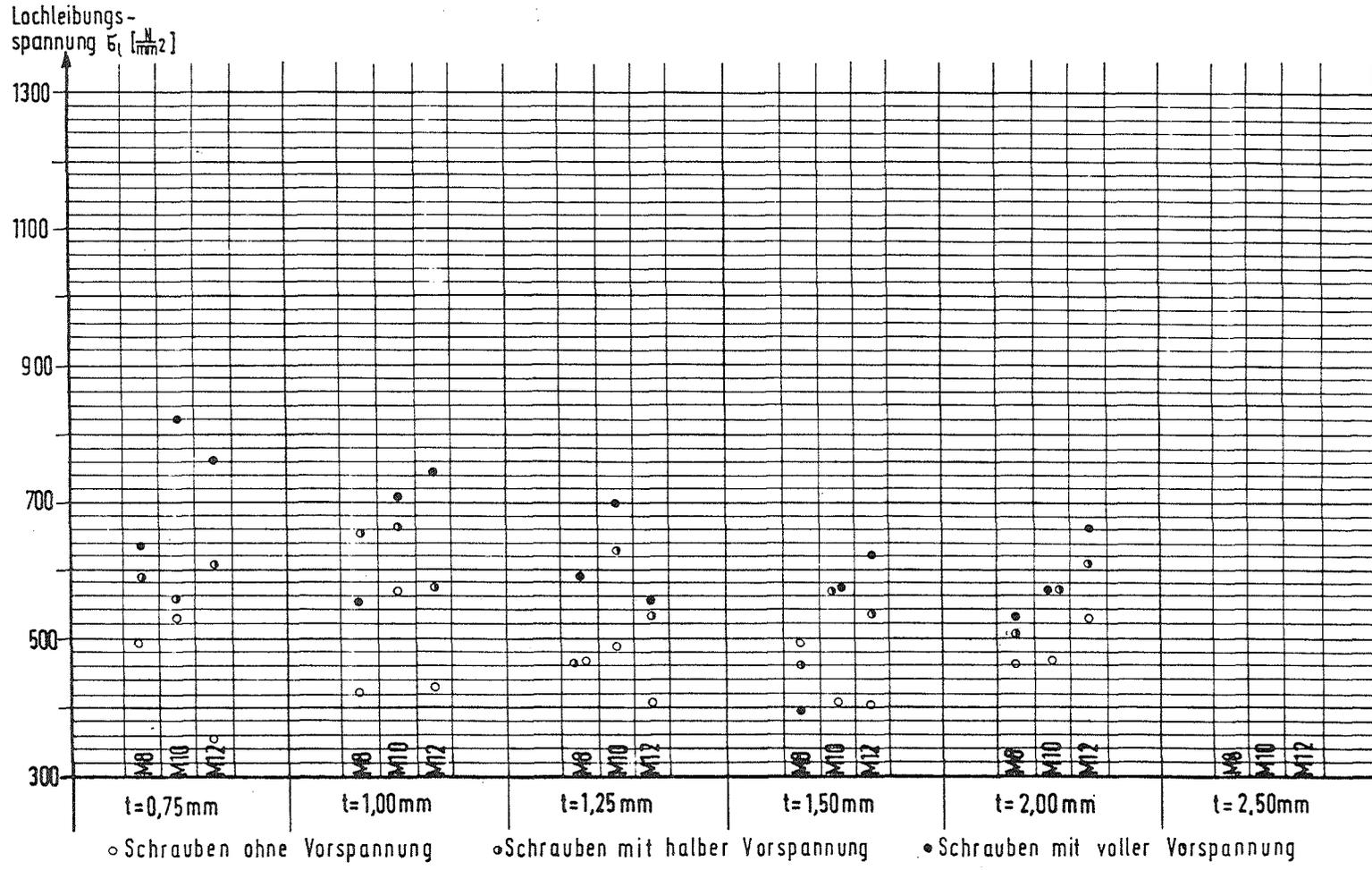


Abb. 5.49

Gemessene Lochleibungsspannung der emaillierten Bleche bei der die Emaille abplatzt (Mittelwert aus 3 Versuchen bei langsam aufgebrachter Last)

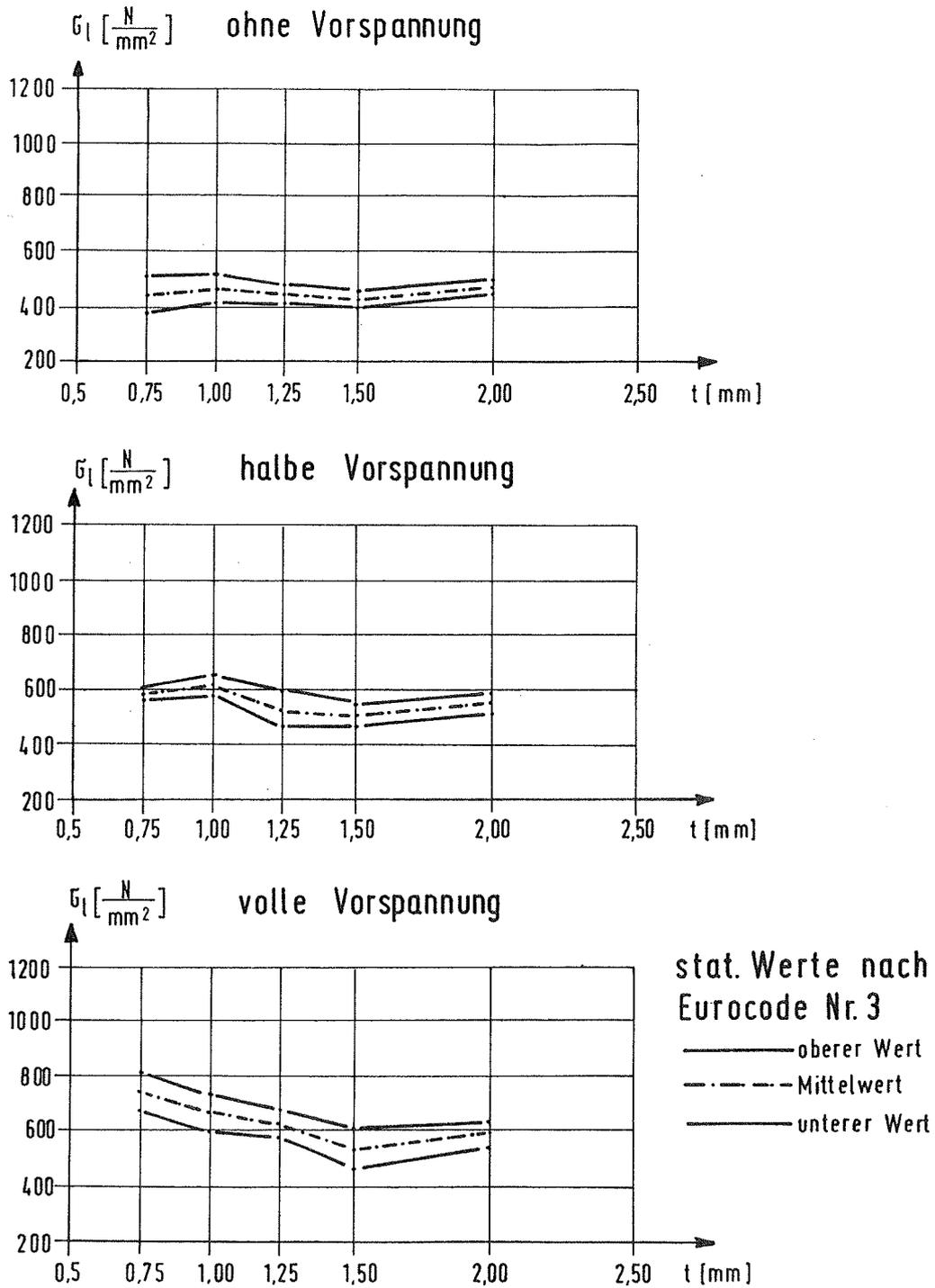


Abb. 5.50

Gemessene Lochleibungsspannung der emaillierten Bleche bei der die Emaillie abplatzt (bei langsam aufgebrachtter Last)

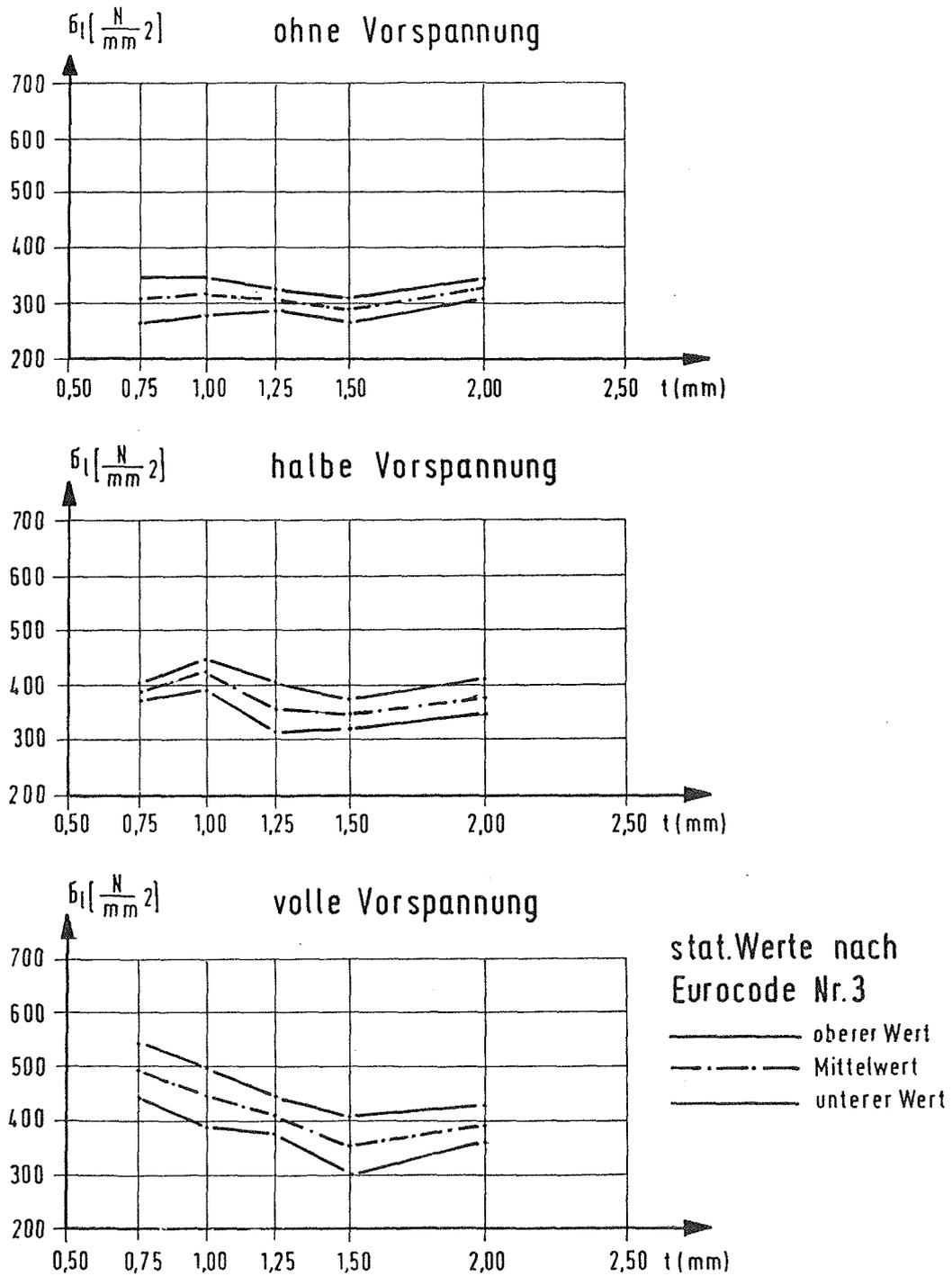


Abb. 5.51

Zulässige Lochleibungsspannung der emaillierten Bleche, bei der die Emallie abplatzt  
 (Sicherheit  $\gamma=1,5$  - bei langsam aufgebrachter Last)

Auffällig ist, daß die Lochleibungsspannungen mit zunehmender Blechdicke bei den Schraubverbindungen mit voller Vorspannung abnehmen. Bei  $t = 0,75$  mm beträgt der Mittelwert  $\sigma_1 = 740$  N/mm<sup>2</sup> und bei  $t = 2,0$  mm ist  $\sigma_1 = 589$  N/mm<sup>2</sup>.

In Abb. 5.50 ist die statistische Auswertung der gemessenen Lochleibungsspannungen dargestellt. Der Einfluß der Vorspannung ist sehr gut erkennbar. Der Mittelwert aus allen Meßergebnissen der Blechdicken beträgt für die Schrauben ohne Vorspannung  $\sigma_1 = 460$  N/mm<sup>2</sup>, für die Schrauben mit halber Vorspannung ergibt  $\sigma_1 = 560$  N/mm<sup>2</sup> und für die Schrauben mit voller Vorspannung beträgt  $\sigma_1 = 630$  N/mm<sup>2</sup>.

Die durch den Sicherheitsbeiwert  $\gamma = 1,5$  dividierten gemessenen Lochleibungsspannungen bei denen die Emaillie abplatzt sind in Abb 5.51 aufgetragen. Danach ergibt sich für die Schrauben **ohne** Vorspannung der kleinste Wert bei  $t = 0,75$  mm mit  $\sigma_1 = 265$  N/mm<sup>2</sup>, der sich bis zur Blechdicke  $t = 2,0$  mm nicht wesentlich ändert.

Bei den Schraubverbindungen mit **halber** und mit **voller** Vorspannung wirkt sich der Einfluß der Vorspannung auf die dünnen Bleche  $t = 0,75$  mm und  $t = 1,0$  mm günstig aus. Hierfür errechnen sich günstigere Lochleibungsspannungen als für die Blechdicken  $t = 1,25$  mm.

Der ungünstigste Bemessungswert ergibt für die Schrauben mit **halber** Vorspannung bei  $t = 1,25$  mm  $\sigma_1 = 318$  N/mm<sup>2</sup> und auch die größte Bandbreite zwischen dem oberen und unteren Bemessungswert wird hier mit  $\Delta\sigma_1 = 84$  N/mm<sup>2</sup> gemessen.

Bei den Schraubverbindungen mit **voller** Vorspannung errechnet sich der kleinste Bemessungswert bei  $t = 1,5 \text{ mm}$   $\sigma_1 = 301 \text{ N/mm}^2$  und die Bandbreite beträgt hier  $\Delta\sigma_1 = 105 \text{ N/mm}^2$ .

## 5.9 Untersuchung der Verschiebungswege

### 5.9.1 Verschiebungsweg bei Erreichen der Traglast

In Abb. 5.52 sind die aus 9 Versuchswerten gemittelten Ergebnisse der Verschiebungswege aufgetragen, die bei Erreichen der Traglast gemessen wurden.

Für die AL, ZN und EM-Bleche trifft zu, daß die nicht vorgespannten Schrauben die größten Verschiebungswege benötigen, bis ihre Tragfähigkeit erschöpft ist. Ein geringerer Verschiebungsweg wurde für die halb vorgespannten Schrauben gemessen und noch geringer ist der Verschiebungsweg bei den voll vorgespannten Schrauben. Eine Ausnahme bilden die kunststoffbeschichteten Bleche. Bei ihnen ist kein Unterschied aufgrund des Vorspanngrades festzustellen. Für alle Bleche trifft zu, daß mit zunehmender Blechdicke die Verschiebungswege größer werden bis die Schraubverbindung versagt. Jedoch nähern sich die Verschiebungen aller Vorspanngrade bei den Blechdicken  $t = 2 \text{ mm}$  einem gemeinsamen Wert, der in etwa zwischen 12 mm und 16 mm liegt.

Bei  $t = 0,75 \text{ mm}$  beträgt die Verschiebung der Schraubverbindung **ohne** Vorspannung 6 bis 12 mm, die der Verbindung mit **halber** Vorspannung 3 bis 10 mm und die Verschiebung der Verbindung mit **voller** Vorspannung 2 bis 6 mm.

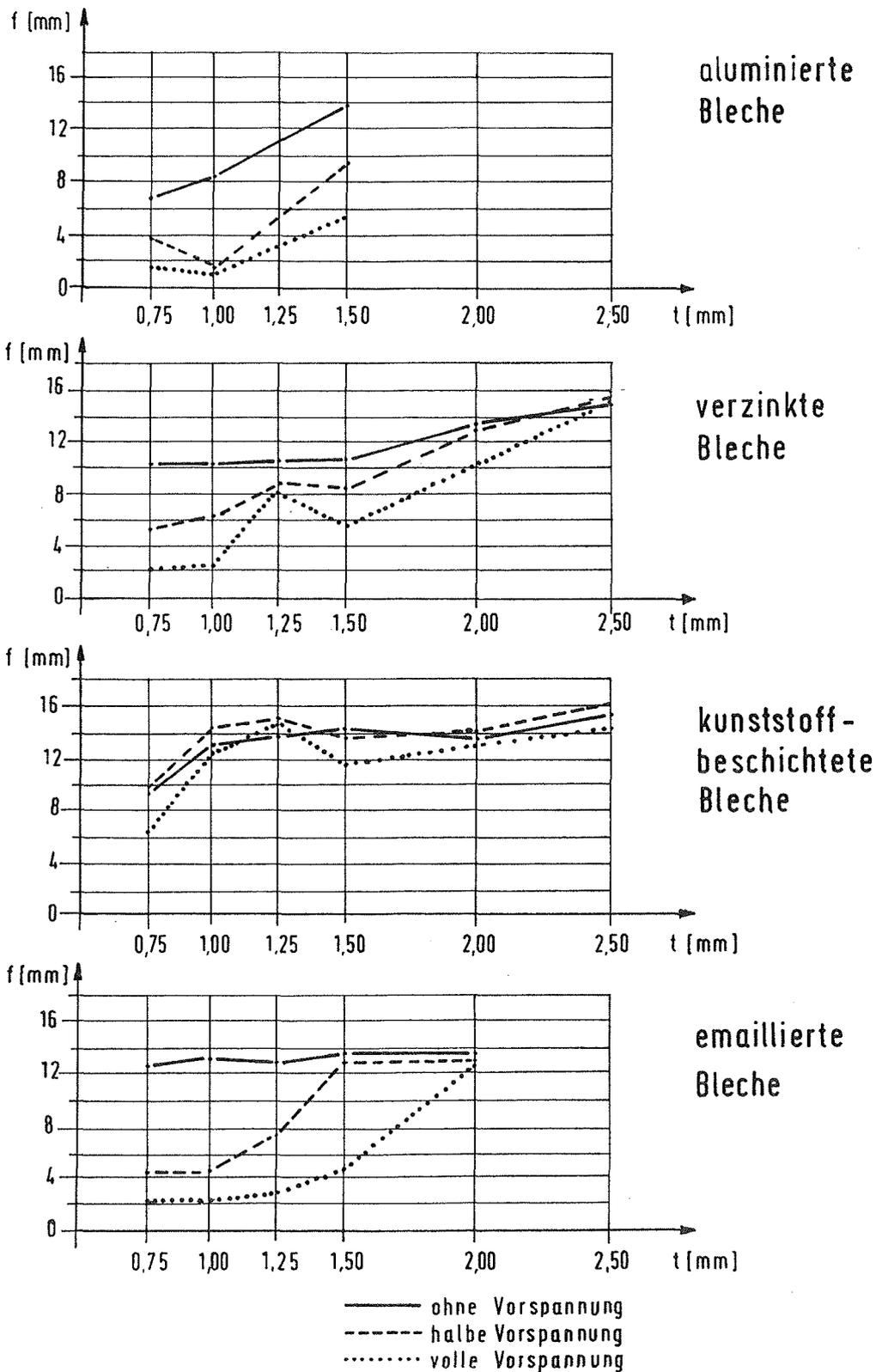


Abb. 5.52

Verschiebungswege bei Erreichen der Traglast  
(Mittelwert aus 9 Versuchsergebnissen)

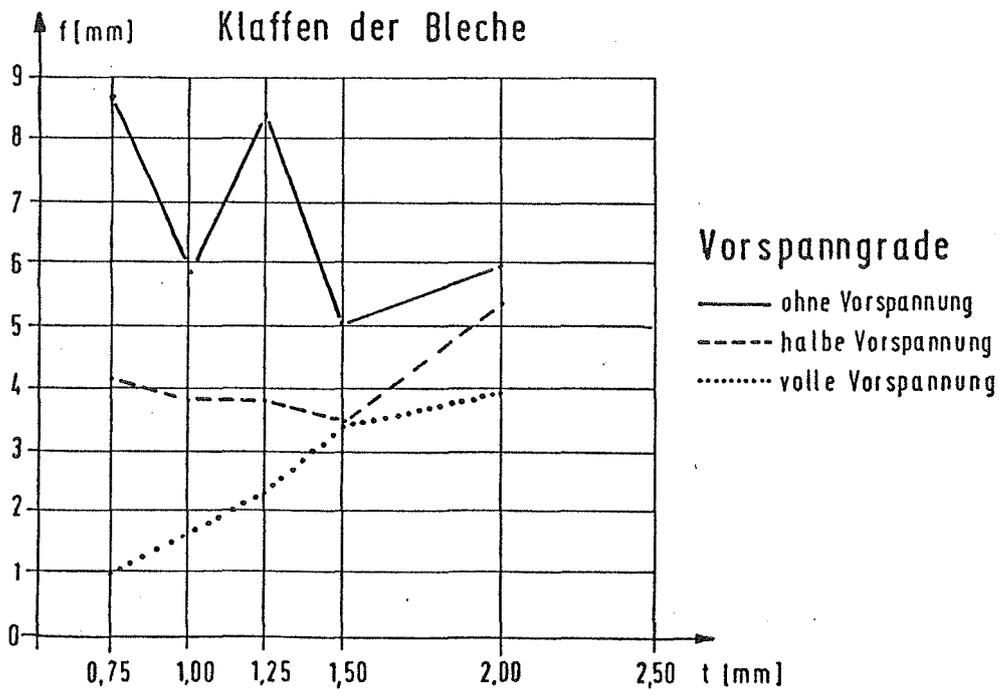
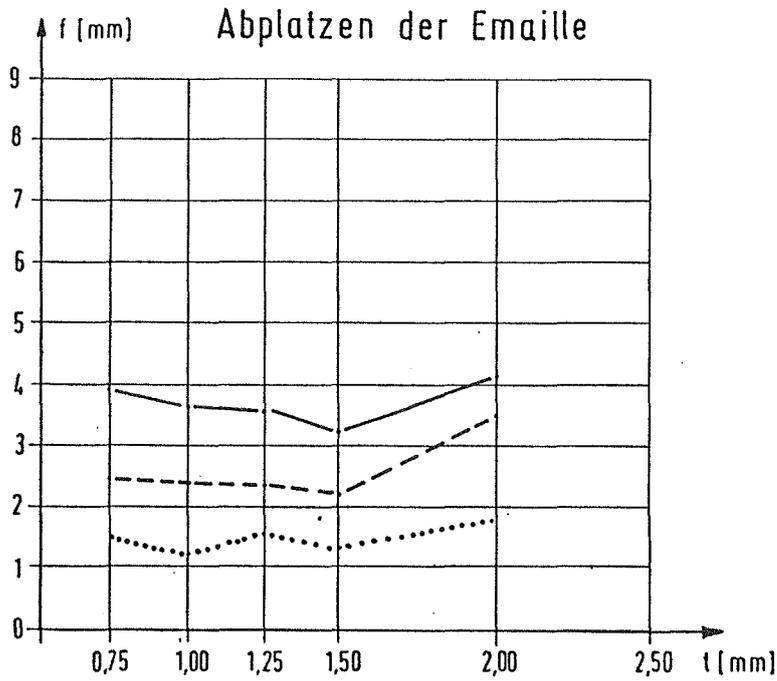


Abb. 5.53

Gemittelte Verschiebungswege bei der die Emaillie abplatzt und Verschiebungswege bei der die emaillierten Bleche zu klaffen beginnen

### 5.9.2 Untersuchung der Verschiebungswege beim Auseinanderklaffen der emaillierten Bleche und beim Abplatzen der Emaille

Die gemittelten Verschiebungswege sind in Abb. 5.53 dargestellt. Das Auseinanderklaffen - die Fuge zwischen den Blechen des Versuchskörpers öffnete sich deutlich - trat bei den Blechen **ohne** Vorspannung auf, nachdem ein Verschiebungsweg von etwa 6 bis 8 mm erreicht war. Die **halb** vorgespannten Schraubverbindungen klafften bei geringeren Wegen auseinander. Hierfür wurden Werte zwischen 4 und 5 mm gemessen. Bei den **voll** vorgespannten Schrauben sind noch geringere Verschiebungswege notwendig, schon bei 1 bis 4 mm klaffen die Bleche auseinander. Anders als bei den Schrauben ohne und mit halber Vorspannung scheinen jedoch die Wege bei dickeren Blechen erheblich größer zu werden.

Es wurde gemessen, daß die Emaille im Bereich des Schraubenkopfes und der Schraubenmutter bei den Schrauben **ohne** Vorspannung bei einem Verschiebungsweg von etwa 4 mm abplatzt. Der Verschiebungsweg der Verbindung mit **halber** Vorspannkraft beträgt etwa 3,0 mm und der der Schrauben mit **voller** Vorspannung nur 1,5 mm. Bei der Blechdicke  $t = 2,0$  mm ist ein geringer Anstieg des Verschiebungsweges gegenüber den übrigen Blechdicken festzustellen.

### 6.0 Ergebnis der Untersuchungen

Die Schraubverbindungen aller Versuchskörper versagten durch Herauskröpfen der Schrauben. Hierbei verformten sich beide Bleche im Bereich der Schrauben so, daß ihre Achsen mit der Wirkungslinie der Zugkraft zusammenfielen. Dabei stellten sich die ursprünglich rechtwinklig zu den Blechachsen verschraubten

Schrauben schräg. Am Kopf oder an der Schraubenmutter traten plastische Verformungen auf, die zum Versagen führten. Es sei darauf hingewiesen, daß es sich bei allen Versuchskörpern um einreihige Verschraubungen handelte. Es ist zu erwarten, daß bei einer mehrreihigen Verschraubung das Versagen durch Herauskröpfen bei höheren Traglasten erfolgt.

Der Einfluß der Vorspannung ist besonders gut in Abb. 6.1 und Abb. 6.2 ablesbar, in denen die Ergebnisse der auf die Zugfestigkeit des St 37-2 bezogenen mittleren Lochleibungsspannungen dargestellt sind:

Die Vorspannung führt nur bei den Blechdicken  $t = 0,75$  mm und  $t = 1,0$  mm zu einer Erhöhung der Traglasten. Für Blechdicken  $t = 1,25$  mm ist der Einfluß der Vorspannung vernachlässigbar. In der Regel wird mit zunehmender Blechdicke die Tragfähigkeit der Schraubverbindungen größer.

Bei einem vorgegebenen Verschiebungsweg von 10 mm liegen annähernd die gleichen Verhältnisse vor, wie für die Traglasten. Auswirkungen auf alle Blechdicken aufgrund der Vorspannung ergeben sich bei einem Verschiebungsweg von 5 mm. Am günstigsten wirkt sich die Vorspannung bei den Blechen der Dicke  $t = 0,75$  mm aus. Der Mittelwert **ohne** Vorspannung beträgt  $G_1 = 550 \text{ N/mm}^2$ , mit **halber** Vorspannung  $G_1 = 700 \text{ N/mm}^2$  und mit **voller** Vorspannung  $G_1 = 850 \text{ N/mm}^2$ .

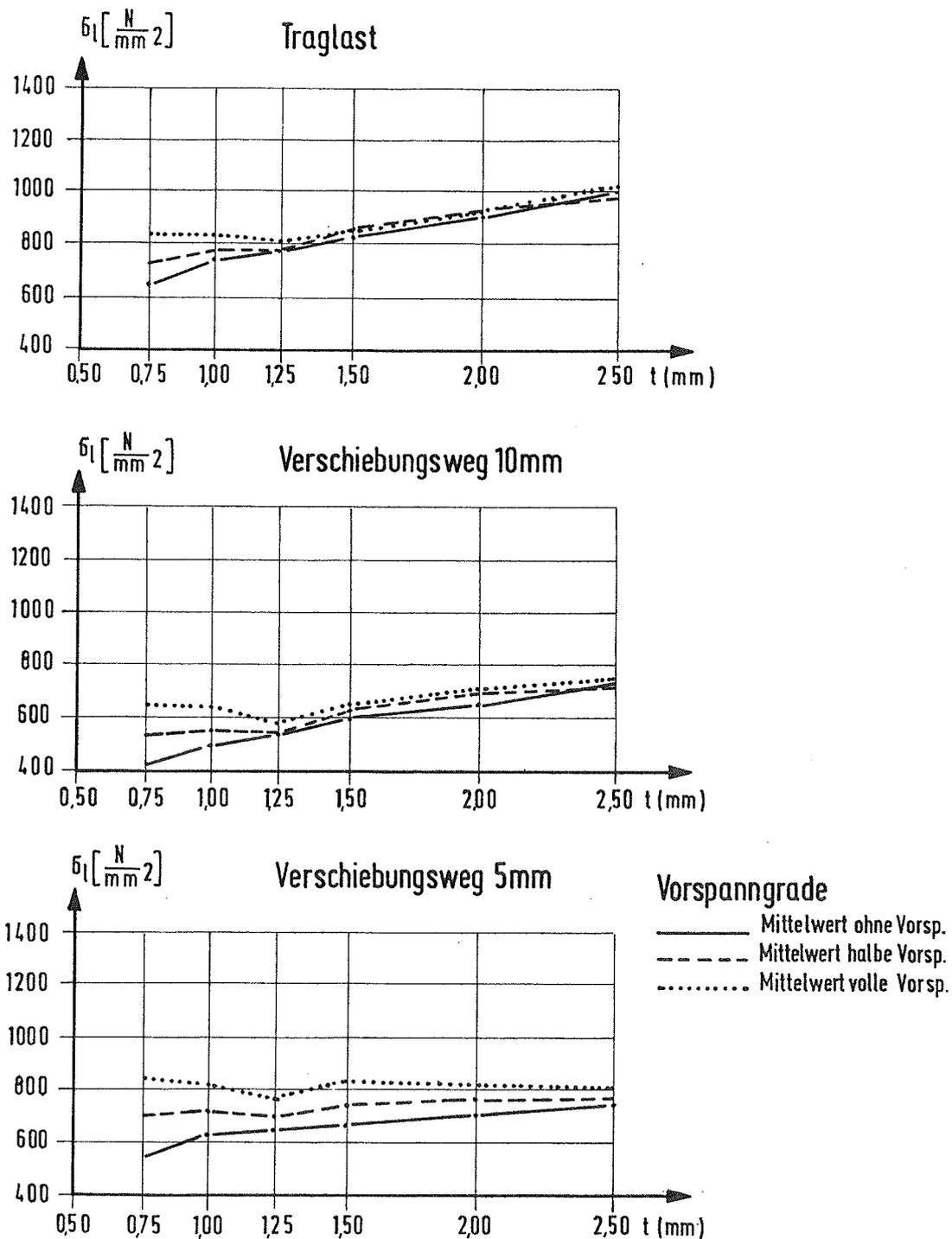


Abb. 6.1

Vergleich der auf den St37-2 bezogenen mittleren Lochleibungs-  
spannungen in Abhängigkeit von der Vorspannung  
(bei langsam aufgebrachtter Last)

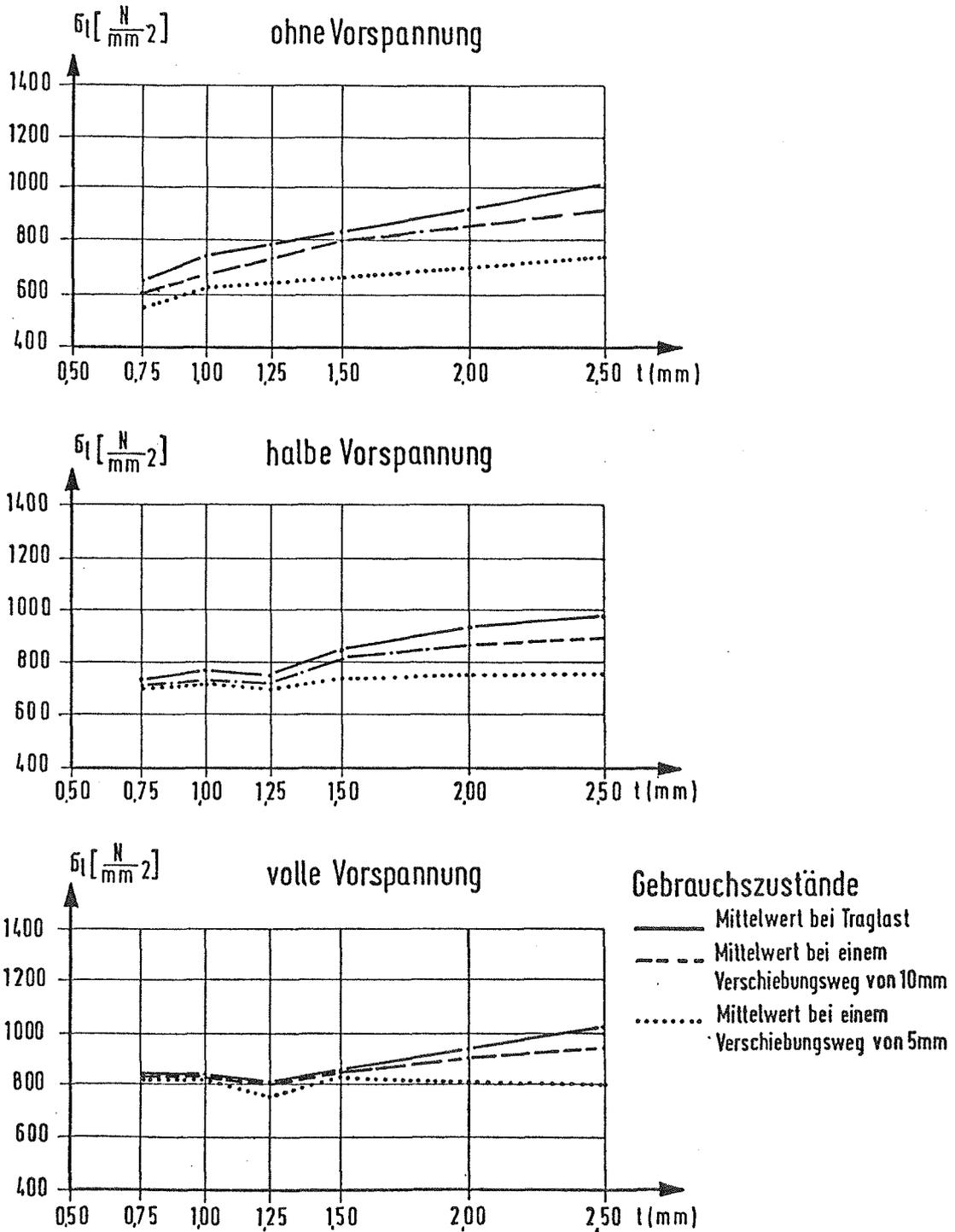


Abb.6.2

Vergleich der auf den St37-2 bezogenen Lochleibungsspannungen in Abhängigkeit von der Vorspannung ( bei langsam aufgebrachtter Last )

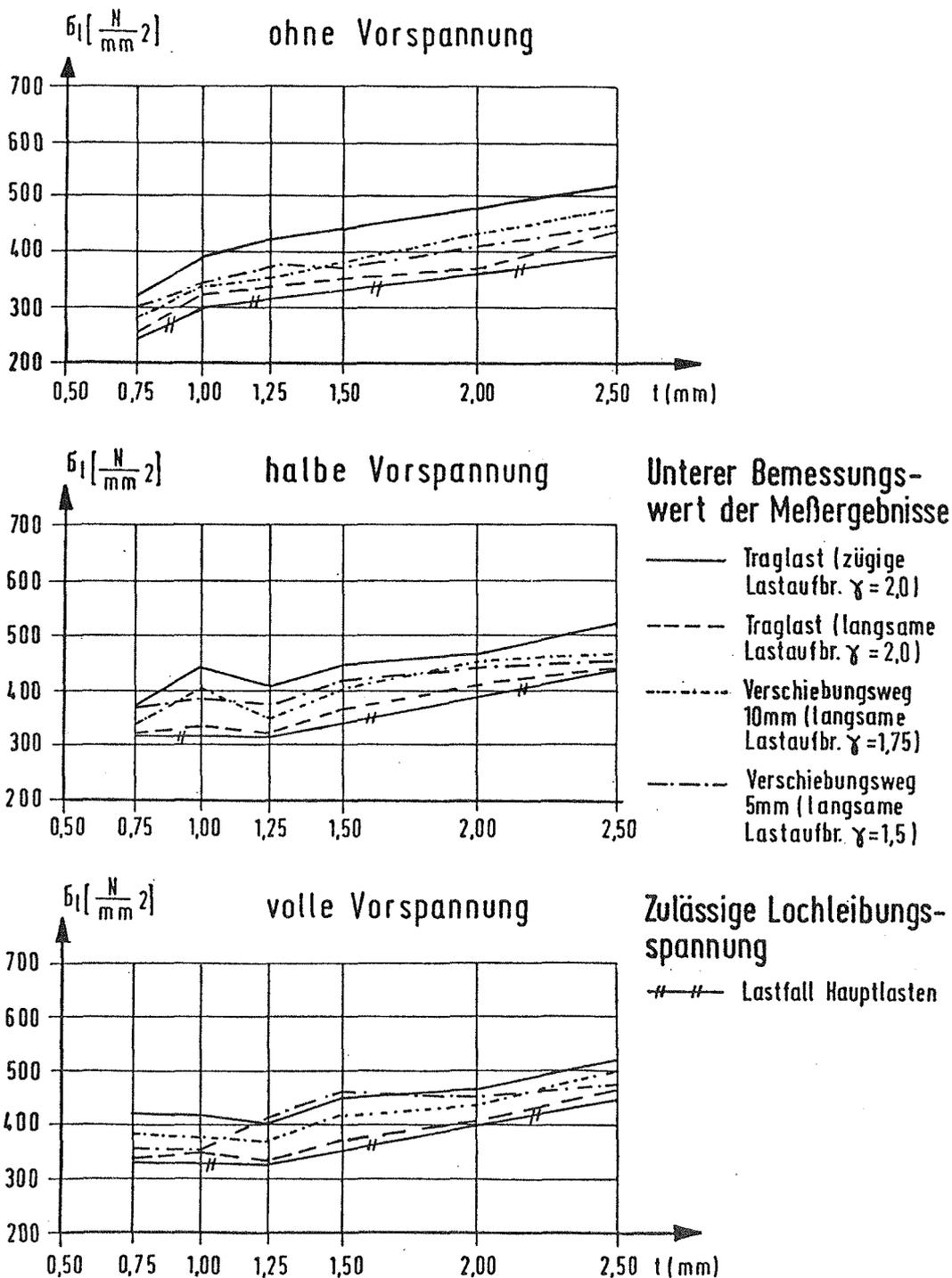


Abb. 6.3

Auf den St 37-2 bezogene zulässige Lochleibungsspannungen für Al, ZN, K, EM - Bleche für den Lastfall H und HZ.

Schraubverbindungen	Lastfall	Blechdicke t (mm)							Nach DIN 18800 T 1 für alle Blechdicken $t \geq 3$ mm
		0,75	1,00	1,25	1,50	2,0	2,5	3,0	
ohne Vorspannung	H	250	300	320	330	370	400	400	280
	HZ	320	370	390	400	440	470	470	320
halbe und volle Vorspannung	H	320	320	320	350	400	450	450	380
	HZ	400	400	400	430	480	530	530	430

Tab. 6.1

Bemessungsvorschlag auf der Grundlage der zulässigen Lochleibungsspannungen für einreihige Schraubverbindungen (Stahl St-37, Schrauben der Güteklasse 10.9)

In Tab. 6.1 wird für die in Abb. 6.3 dargestellten unteren Meßergebnisse ein Bemessungsvorschlag auf der Grundlage von zulässigen Lochleibungsspannungen unterbreitet. Die Blechdicken gehen als Einflußgröße mit ein. Zwischen Schrauben mit voller Vorspannung und halber Vorspannung wird nicht unterschieden, da die Ergebnisse kaum voneinander abweichen. Allerdings wiesen die vorgespannten Schrauben im Gebrauchszustand ein günstigeres Verformungsverhalten auf (Abb. 6.2) als die Schraubverbindungen ohne Vorspannung, d. h. bei kleinen Verschiebungswegen sind bei vorgespannten Schrauben größere Lastübertragungen möglich.

Die zulässigen Lochleibungsspannungen sind auf den Stahl St-37 bezogen. Weisen die zu verbindenden Bauteile eine höhere Zugfestigkeit als  $R_m = 360 \text{ N/mm}^2$  auf, so können die zulässigen Lochleibungsspannungen erhöht werden, indem sie mit dem Faktor aus dem Verhältnis der gemessenen Zugfestigkeit zur bezogenen Zugfestigkeit ( $R_m = 360 \text{ N/mm}^2$ ) multipliziert werden. Bei einer geringeren Zugfestigkeit sind die zulässigen Lochleibungsspannungen entsprechend zu verringern. Zum Vergleich sind die zulässigen Lochleibungsspannungen, wie sie sich nach DIN 18 800 T 1 Tab. 7 ergeben, in Tab. 6.1 mit angegeben. Die Lochleibungsspannungen der emaillierten Bleche sind, unabhängig von der Blechdicke, für die Schraubverbindungen **ohne** Vorspannung auf zul  $\sigma_1 = 260 \text{ N/mm}^2$  zu begrenzen und bei **halb** und **voll** vorgespannten Schrauben auf zul  $\sigma_1 = 300 \text{ N/mm}^2$ .

Die Verschiebungswege der drei Vorspanngrade nähern sich bei Erreichen der Traglast bei Blechdicken  $t > 2,0 \text{ mm}$  etwa einem gleichen Endwert von  $f_T = 12,0$  bis  $16,0 \text{ mm}$ . Bei dünneren Blechen sind die Verschiebungswege der Verbindungen ohne Vorspannung am größten und die mit Vorspannung am kleinsten. Eine Ausnahme bilden die kunststoffbeschichteten Bleche. Hierfür wurden annähernd gleiche Verschiebungswege gemessen.

Als mittleren Abminderungsfaktor  $a_D$  mit dem die bei zügiger Lastaufbringung erhaltene Zugfestigkeit und Streckgrenze der Zugproben nach DIN 50 146 zu multiplizieren sind, um sie auf dauerhaft zu ertragene Lasten anwenden zu können, ergaben die AL-Bleche  $a_D = 0,90$ , die ZN-Bleche  $a_D = 0,88$ , die K-Bleche  $a_D = 0,90$  und die EM-Bleche  $a_D = 0,86$ . Hierzu vgl. Tab. 5.1. Allgemein ergaben die miteinander verschraubten Bleche der Versuchskörper ungünstigere Abminderungsfaktoren, da in den Versuchskörpern Bereiche unterschiedlicher Beanspruchungen auftreten. Bei den AL-Blechen wurde  $a_D = 0,81$ , bei den ZN-Blechen, K-Blechen und EM-Blechen wurde jeweils  $a_D = 0,84$  ermittelt.

Die untersuchten mit Aluminium überzogenen Bleche genügten den Anforderungen nach DIN 17 100. Die Mindestwerte der Zugfestigkeit, der Streckgrenze und der Bruchdehnung wurden jeweils eingehalten. Für die verzinkten Bleche wurden bei den Dicken  $t = 0,75$  mm und  $t = 1,00$  mm Unterschreitungen der Zugfestigkeit gemessen. Die mit Kunststoff beschichteten Bleche unterschritten bei den Blechdicken  $t = 0,75$  mm,  $t = 1,50$  mm und  $t = 2,0$  mm die Zugfestigkeit geringfügig. Bei der Blechdicke  $t = 2,50$  mm handelte es sich offensichtlich um einen höherwertigen Stahl, da die gemessene Zugfestigkeit und Streckgrenze erheblich von den übrigen Ergebnissen abwichen.

Die emaillierten Bleche lassen sich aufgrund der hier untersuchten Werkstoffkennwerte nicht dem St 37-2 zuordnen. Die Zugfestigkeit und Streckgrenze sind kleiner, wohingegen die Bruchdehnung größer ist, vgl. Tab. 4.6.

Als Überzugsdicke der mit Aluminium überzogenen Bleche wurden im Mittel  $24 \mu\text{m}$ , bei den verzinkten Blechen  $19 \mu\text{m}$ , bei den mit Kunststoff beschichteten Blechen  $199 \mu\text{m}$  und bei den emaillierten Blechen  $348 \mu\text{m}$  gemessen. Die Abweichungen vom Mittelwert betragen  $\pm 50 \%$ , vgl. Tab. 4.1.

Die gemessenen Blechdicken der mit Aluminium überzogenen und die der verzinkten Bleche bewegten sich innerhalb der Toleranzgrenzen der DIN 1541, allerdings häufig im unteren Bereich der zulässigen Regelabweichung.

Für die mit Kunststoff beschichteten und die emaillierten Bleche wurden Dicken gemessen, die sich ebenfalls innerhalb der zulässigen Grenzen bewegten, jedoch größtenteils oberhalb der Nennblechdicke, vgl. Tab. 4.3 und 4.4.

## 7.0 Zusammenfassung

Es wurde die Tragfähigkeit von einreihigen Schraubverbindungen an aluminieren, verzinkten, kunststoffbeschichteten und emaillierten dünnwandigen Blechen untersucht. Die Verschraubungen wurden mit Schrauben M 8, M 10 und M 12 der Festigkeitsklasse 10.9 hergestellt. Folgende Vorspanngrade wurden aufgebracht:

$$F = 0, 0,5 F_v \text{ und } 1,0 F_v.$$

Die Versuche ergaben, daß mit zunehmender Blechdicke die Tragfähigkeit der Schraubverbindungen zunimmt.

Anders als erwartet, führte die Vorspannung der Schrauben zu keiner wesentlichen Erhöhung der Tragfähigkeit (vgl. Tab. 6.1). Jedoch wurde bei den halb und voll vorgespannten Schrauben ein günstigeres Verformungsverhalten gemessen als bei den nicht vorgespannten Schrauben.

Durch das Abplatzen der Emaillie ergaben sich bei den emaillierten Blechen geringere zulässige Lochleibungsspannungen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden in DIN 18 914 "Dünnwandige Rundsilos aus Stahl", Tab. 2 berücksichtigt.

Spannungsart			Festigkeitsklasse									
			4.6		5.6		6.8		8.8		10.9	
			H	HZ	H	HZ	H	HZ	H	HZ	H	HZ
Abscheren zul $\tau_a$ $N/mm^2$			112	126	168	192	180	204	192	216	240	270
zul $\sigma_1$ <sup>1)</sup> $N/mm^2$	St 37-2 St 37-3	ohne Vorspannung:	280	320	280	320	280	320	280	320	280	320
		mit Vorspannung: > 0,5 $F_v$	-	-	320	360	350	400	380	430	380	430
	St 52-3	ohne Vorspannung:	280	320	420	470	420	480	420	480	420	480
		mit Vorspannung: > 0,5 $F_v$	-	-	470	530	500	570	520	600	570	645
Zug II zur Schraubenachse zul $\sigma_z$ $N/mm^2$			110	125	150	170	200	235	260	300	360	410
<p>1) Bei einreihigen Verschraubungen von emaillierten Blechen sowie von allen übrigen Blechen mit Dicken <math>t &lt; 1,25</math> mm ist der zulässige Lochleibungsdruck um 10 % abzumindern.</p>												

Tabelle 2 der DIN 18 914

Zulässige Abscherspannung  $\tau_a$ , zulässige Zugspannung  $\sigma_z$   
und zulässiger Lochleibungsdruck  $\sigma_1$ .

In weiteren Forschungsarbeiten ist zu untersuchen, welche Lochleibungsspannungen von zwei- oder dreireihigen Schraubverbindungen aufgenommen werden können. Es ist anzunehmen, daß sich die Tragfähigkeit, insbesondere die der dünnen Bleche, erhöht, da dort die Versagensart vermutlich durch Überschreitung der zulässigen Lochleibungsspannung auftreten wird und nicht - wie im vorliegenden Bericht beschrieben - durch Herauskröpfen der Schrauben. Diese Vermutung stützt sich auf die Tatsache, daß eine zweireihige Verbindung in der Lage ist, bis zu einem gewissen Grade Biegemomente zu übertragen.

Des weiteren sollten Schraubverbindungen mit höherwertigen Blechen untersucht werden, wobei das Versuchsprogramm allerdings erheblich verringert werden kann. Mit relativ geringem Aufwand können weitere Wissenslücken über das Tragverhalten der Schraubverbindungen in dünnen Blechen geschlossen werden.

## Literatur

- /1/ Eurocode Nr. 3                    Gemeinsame einheitliche Regeln für  
Stahlbauten  
Ausgabe 1984
- /2/ DIN 1541                            Flachzeug aus Stahl; Kaltgewalztes  
Breitband und Bleche aus unlegierten  
Stählen; Maße, zulässige Maß- und  
Formabweichungen.
- /3/ DIN 1623 Teil 1                    Flacherzeugnisse aus Stahl; Kaltge-  
walztes Band und Blech; Technische  
Lieferbedingungen.
- /4/ DIN 1623 Teil 2                    Feinbleche aus unlegierten Stählen;  
Feinbleche aus allgemeinen Baustählen;  
Gütevorschriften
- /5/ DIN 1623 Teil 3                    Flacherzeugnisse aus Stahl; Kaltge-  
walztes Band und Blech; Technische  
Lieferbedingungen; Weiche unlegierte  
Stähle zum Emaillieren.
- /6/ DIN 17 100                         Allgemeine Baustähle: Gütenorm  
Ausgabe Januar 1980
- /7/ DIN 18 800 Teil 1                    Stahlbauten: Bemessung und Konstruktion  
Ausgabe März 1981
- /8/ DIN 18 914                         Dünnwandige Rundsilos aus Stahl  
Entwurf, Ausgabe November 1983
- /9/ DIN 50 114                         Zugversuch ohne Feindehnmessung an  
Blechen, Bändern und Streifen mit einer  
Dicke unter 3 mm
- /10/ DIN 55 928 Teil 1                    Korrosionsschutz von Stahlbauten durch  
Beschichtungen und Überzüge
- /11/ Scheer, J.  
Maier, W.  
Klahold, M.                            Versuche an geschraubten Verbindungen  
Bericht Nr. 8100  
Technische Universität Braunschweig  
Institut für Stahlbau, Mai 1984  
(unveröffentlicht)
- /12/ Scheer, J.  
Maier, W.  
Klahold, M.                            Zugproben 1. Ergänzung zu Bericht 8100  
Bericht Nr. 8119  
Technische Universität Braunschweig  
Institut für Stahlbau, Juli 1984  
(unveröffentlicht)
- /13/ Valtinat, G                         Stahlbau Handbuch, S. 402 ff  
14. Auflage  
Verlag Stahl u. Eisen 1982, Köln