Frigyes T h a m m - Róbert G á t i - Gábor V ö r ö s

Hybride Untersuchung von Eigenspannungszuständen

1. Einleitung.

Die Kenntnis der Eigenspannungen hat in der letzten Zeit stark an Bedeutung zugenommen, da ihr Einfluss auf das Ermüdungs- und Stabilitätsverhalten, sowie auf die Spannungskorrosion der immer höher beanspruchten Konstruktionen bedeutend sein kann. Zur Messung der Eigenspannungen sind bereits zahlreiche zerstörende und zerstörungsfreie Methoden ausgearbeitet worden [1] - [8] .

Die Ursache der Eigenspannungen sind behinderte inhomogene Formänderungen, die durch ungleiche Abkühlung, physikalisch chemische Zustandsänderungen oder durch inhomogene plastische Formänderung hervorgerufen werden. Ist die Ursache der Eigenspannungen bekannt, kann ihre Verteilung auch auf theoretischem Wege ermittelt werden /[9] - [12]/. Wegen der Komplexität der die Eigenspannungszustände verursachenden Prozesse sind jedoch diese Berechnungsmethoden für die technische Praxis entweder zu umständlich oder wegen zu weitgetriebener Vereinfachungen nicht genügend glaubwürdig.

Die Messmethoden andereseits ergeben zwar die tatsächliche Verteilung der Eigenspannungen in dem untersuchten Bauteil, jedoch entweder auf Kosten der Zerstörung des Bauteiles oder im Falle röntgenografischer Methoden auf Kosten einer langwierigen, nur in Einzelfällen einsetzbaren Prozedur. Die Messresultate scheinen meistens nur punktweise auf und geben keinen Aufschluss über die die Eigenspannungen auslösenden Ursachen, wodurch die Anwendung der Messresultate auf Bauteile anderer Gestalt stark erschwert wird.

Der Kostrukteur hingegen benötigt eine Methode, mit Hilfe derer er die Verteilung der Eigenspannungen im Falle bekannter Verarbeitungsmethoden aufgund einer nicht allzu auf-

wendigen Methode für Bauteile beliebiger Gestalt abschätzen könnte.

Als eine solche Methode bietet sich die neuerdings im Verbreiten begriffene sog. hybride Methode [13] [14] an. Diese bedeutet die gemeinsame Verwendung von Berechnung und Messung zur Lösung von Festigkeitsproblemen. Im vorliegenden Fall bedeutet sie die Berechnung der Spannungsverteilung nach einer vereinfachten Methode, wobei jedoch auf theoretischem Wege nur schwer oder nur in roher Annäherung bestimmbare Ausgangswerte der Berechnung offen gelassen und anschliessend durch Messung ermittelt werden. Die Methode soll nun an zwei Beispielen erläutert werden.

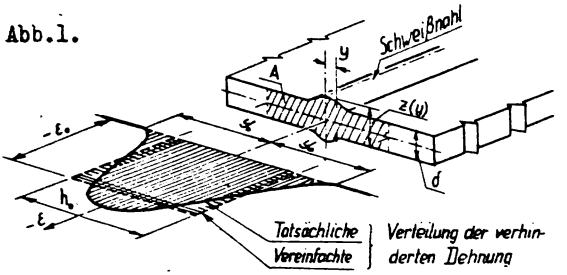
2. Eigenspannungsverteilung in der Umgebung von Stumpfschweissnähten.

Beim Schweissen kühlt sich die Umgebung der Naht nach dem Schweissvorgang aus einer sehr ungleichmässigen Temperaturverteilung ab, wobei auch noch volumändernde metallografische Umwandlungen ablaufen. Die dadurch hervorgerufenen Formänderungen werden von den abseits der Naht liegenden und von Wärmeeinflössen nicht oder nur wenig beeinflussten Bauteilpartieen behindert. Der dadurch hervorgerufene Spannungszustand wird z.T. durch plastische Verformungen während des Abkühlprozesses abgebaut. Der danach verbleibende Restzustand bildet den Zustand der Eigenspannungen. Dieser kann summarisch durch einen negativen Dehungswert $-\varepsilon$ charakterisiert werden, mit der sich die Zone der Wärmeeinwirkung /im Folgenden WEZ / bei konstantem E-modul zusammenziehen würde. Bei der Wärmedehnung erfolgt das Schrumpfen isotrop, für die meisten praktischen Zwecke genügt es jedoch, die Dehnung nur in Richtung entlang der Schweissnaht zu berücksichtigen.

ε ist über die Breite der WEZ nicht gleichmässig verteilt. /s.Abb.1./. Zur weiteren Vereinfachung der Untersuchung soll sie durch einen längs der Breite h_0 konstanten Wert $-\varepsilon_0$ ersetzt werden. Diese Ersatzdehnung ist dann der tatsächlichen Dehnungsverteilung gleichwertig, wenn mit den Bezeichnungen der Abb.1. gilt

$$\varepsilon_o = \frac{1}{A}\int_{-y_o}^{+y_o} z(y)\cdot\varepsilon\, dy \quad \cong \frac{1}{h_o}\int_{-y_o}^{+y_o}\varepsilon\, dy \qquad (1)$$

Abb.1.



Für die Grösse der Eigenspannungen ist der Wert $EA\varepsilon_o \approx Eh_o\delta\varepsilon_o$ charakteristisch /E:E-modul/ Würden sich die Teile ausserhalb der WEZ vollständig starr verhalten, würde in einer "unendlich langen" geraden Schweissnaht eine Kraft dieser Grösse entstehen. Sind ε_o und h_o bekannt, so kann die Verteilung der Eigenspannungen prinzipiell in Scheiben beliebigem Umrisses bestimmt, oder wenigstens abgeschätzt werden.

Zur Bestimmung von h_o und ε_o wurden Testplatten mit Rechteckgrundriss mit je einer Stumpfschweissnaht in der Symmetrieachse gemäss der Abb.2. benutzt. Die Verteilung der Eigenspannungen wurde zunächst theoretisch ermittelt, dann experimentell bestimmt. Die Berechnung erfolgte in 3 Näherungsstufen

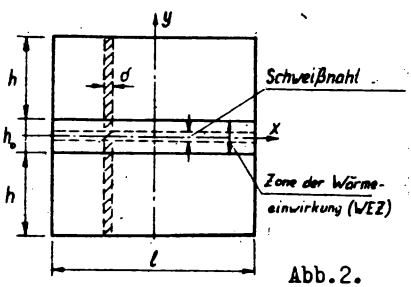


Abb.2.

1./ in "genügender Entfernung" von beiden Enden der Naht kann die Verteilung der Spannungskomponente in der x-Richtung sowohl in, wie ausserhalb der WEZ als konstant angenommen werden. Gemäss den Bezeichnungen der Abb.3. ergibt sich aus der Gleichgewichtsbedingung der kräft in x-Richtung

$$-\sigma_x\, 2h\delta + \sigma_{vx}\, h_o\delta = 0 \qquad (2)$$

Abb.3.

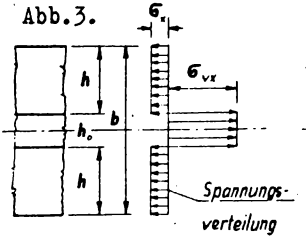
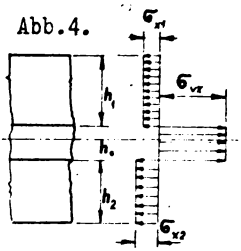


Abb.4.



Die Spannungskomponenten in der y-Richtung vernachlässigt, ergibt das einfache Hooke-sche Gesetz

$$-E\varepsilon_0 + \sigma_{vx} = -\sigma_x \quad (3)$$

Gl (2) und (3) ergibt nun

$$\left.\begin{aligned} \frac{\sigma_x}{E\,\varepsilon_0} &= \frac{h_0}{2h + h_0} = \frac{h_0}{b} \quad \text{bzw.} \quad E\,\varepsilon_0 = \sigma_x \frac{2h+h_0}{h_0} \\ \frac{\sigma_{vx}}{E\,\varepsilon_0} &= \frac{2h}{2h + h_0} = \frac{b - h_0}{b} \end{aligned}\right\} \quad (4)$$

Durch Unregelmässigkeiten des Schweissprozesses kann sich die WEZ aus der Symmetrieebene der Probeplatte verlagern /Abb.4./ Gl.(2) erhält dann die Form

$$-\sigma_{x1}\, h_1 \delta - \sigma_{x2}\, h_2 \delta + \sigma_{vx}\, h_0 \delta = 0 \quad (2a)$$

und Gl. (3) in roher Annäherung

$$-E\,\varepsilon_0 + \sigma_{vx} = -\frac{1}{2}(\sigma_{x1} + \sigma_{x2}) \quad (3a)$$

Gl(2a) und (3a) ergibt

$$E\,\varepsilon_0 = \sigma_{x1}\left(\frac{h_1}{h_0} + \frac{1}{2}\right) + \sigma_{x2}\left(\frac{h_2}{h_0} + \frac{1}{2}\right) \quad (4a)$$

Die Gl. (4) und (4a) sollen im späteren zur Auswertung der Messresultate herangezogen werden.

2. Berechnung nach der Biegetheorie. Die Spannungsverteilung gemäss den Abb.3 und 4. vernachlässigt den Einfluss der Verformung der Teile der Platte ausserhalb der WEZ quer zur Längsrichtung der Schweissnaht, wie sie in der Abb.5a gezeigt wird. Diese Verformungen werden durch σ_y-Spannungskomponenten wieder rückgängig gemacht, wie es in der Abb. 5. gezeigt wird. Die Berechnung dieser Spannungskomponente ist auf der Basis der Biegetheorie durchgeführt worden, wobei der Teil der Platte ausserhalb der WEZ als Biegebalken betrachtet worden war. Durch die Abmessungsverhältnisse dieses Plattenteiles erwies

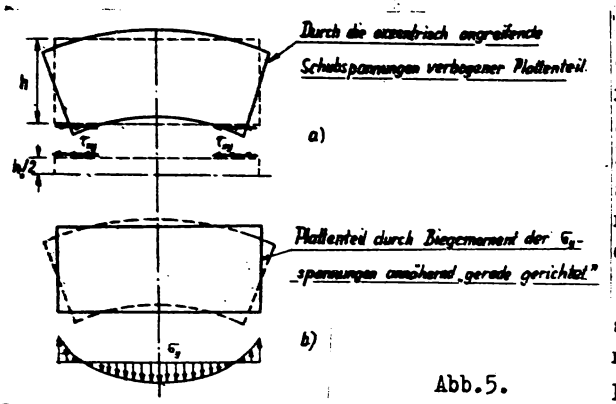


Abb.5.

sich jedoch diese Berechnungsmethode als unzuverlässig, und soll hier nicht behandelt werden.

3. Numerische Berechnung. Um die praktische Brauchbarkeit der Gleichungen (4) und (4a) zur Auswertung von Messergebnissen zu prüfen, wurde eine Finite-Element-Berechnung durchgeführt. Das Netzwerk der Berechnung zeigt die Abb. 6. Die Resultate der Berechnung nach den 3 Methoden zeigt die Abb.7. für $h_0 = 4$ cm. Kurvenzug 1 entspricht Gl. 4 , Kurvenzug 2 der Biegebalken-Methode und Kurvenzug 3 der Methode der

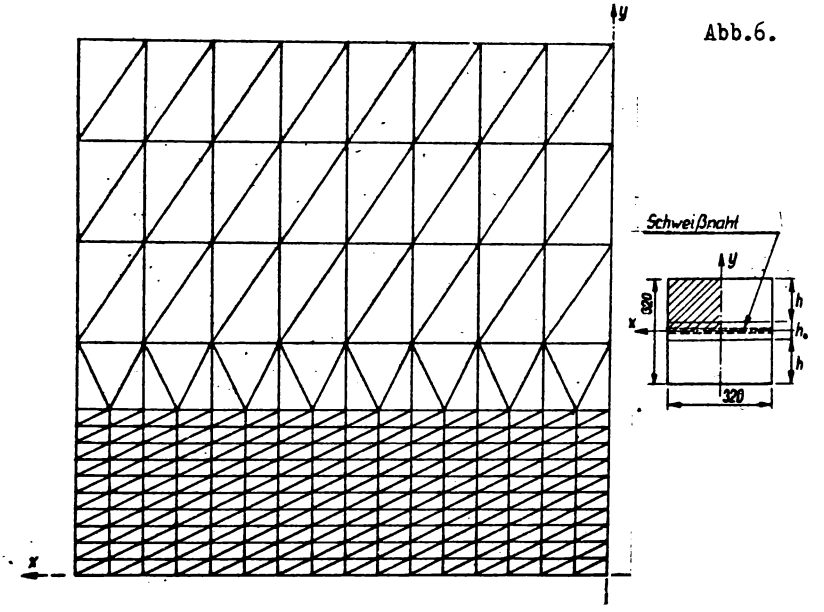


Abb.6.

Abb. 7

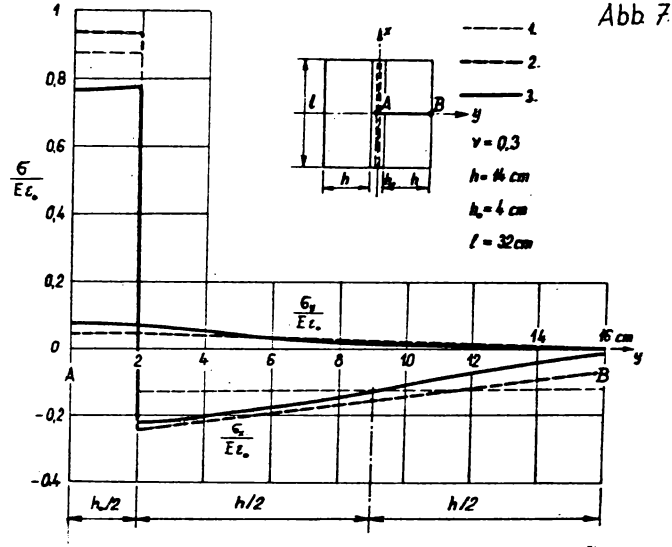

1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
-0,2
-0,4
σ/Eε₀
σy/Eε₀
σx/Eε₀
2
4
6
8
10
12
14
16 cm
y
A
B
h/2
h/2
h/2
x
l
h
h
1.
2.
3.
ν = 0,3
h = 14 cm
h₀ = 4 cm
l = 32 cm

Abb. 8

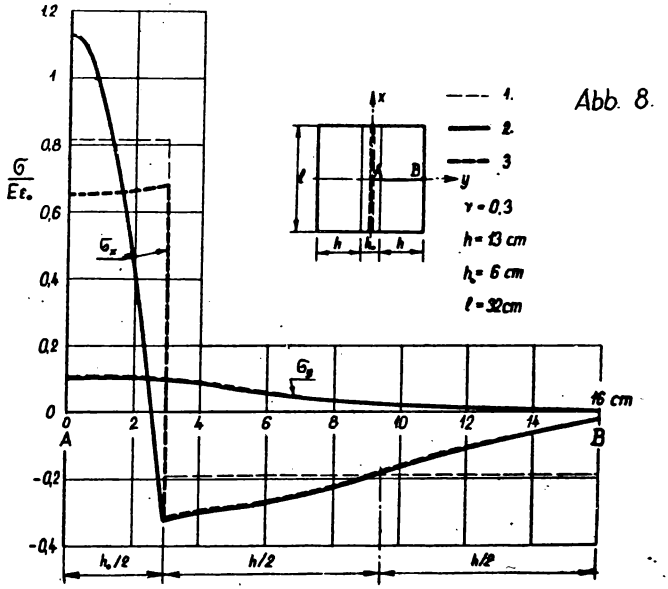
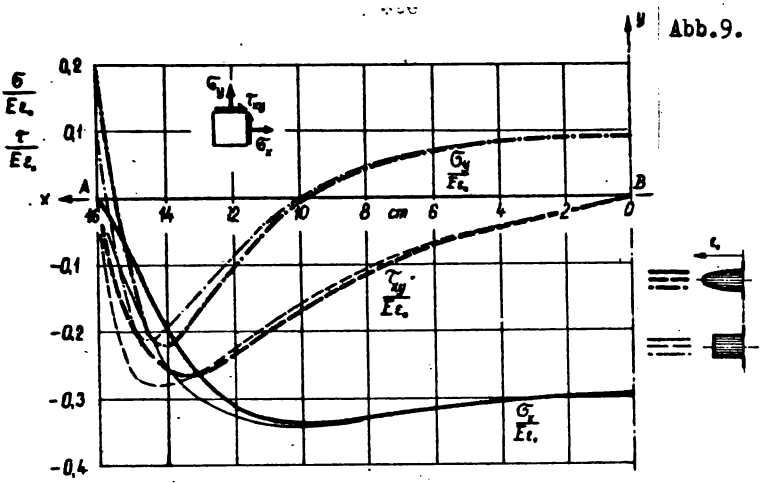
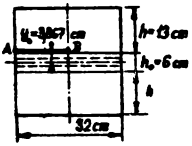

1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
-0,2
-0,4
σ/Eε₀
σx
σy
2
4
6
8
10
12
14
16 cm
A
B
h/2
h/2
h/2
x
l
h
h
1.
2
3
ν = 0,3
h = 13 cm
h₀ = 6 cm
l = 32cm

Abb.9.





finiten Elemente. Bemerkenswert ist die gute Übereinstimmung zwischen dem elementar berechneten Wert und dem Wert der Berechnung nach der Methode der Finiten Elemente an der Stelle h/2, d.h. der Mittelliniedes Plattenstreifens ausserhalb der WEZ.

Um den Einfluss der tatsächlichen Verteilung des Dehnungswertes ε über die Breite der WEZ abzuschätzen, wurde bei gleichen Plattenabmessungen wie in der Abb.7., jedoch für h_0 = 6 cm die Spannungsverteilung für ε_0=const über h_0 mit der für eine über h_0 parabolisch verteilten Dehnung verglichen. Die Resultate der numerischen Berechnung zeigen die Abb. 8 und 9. In die Abb. 8 ist /dünngestrichelt, Kurvenzug 1/ auch noch die σ_x-Verteilung nach den Gl.(4) eingezeichnet. Kurvenzug 2 entspricht der parabolischen, Kurvenzug 3 der gleichmässigen Dehnungsverteilung in der WEZ. Wie aus der Abb. 8 ersichtlich, stimmt ausserhalb der WEZ die Spannungsverteilung der Kurvenzüge 2 und 3 auffallend gut überein, auch die Übereinstimmung mit dem Kurvenzug an der Stelle h/2 ist sehr gut. /Die Verteilung nach der Biegebalkenmethode ist nicht eingezeichnet, sie weicht stark von den anderen Resultaten ab. Auch die Abb. 9 zeigt nur geringe Abweichung der Spannungs-

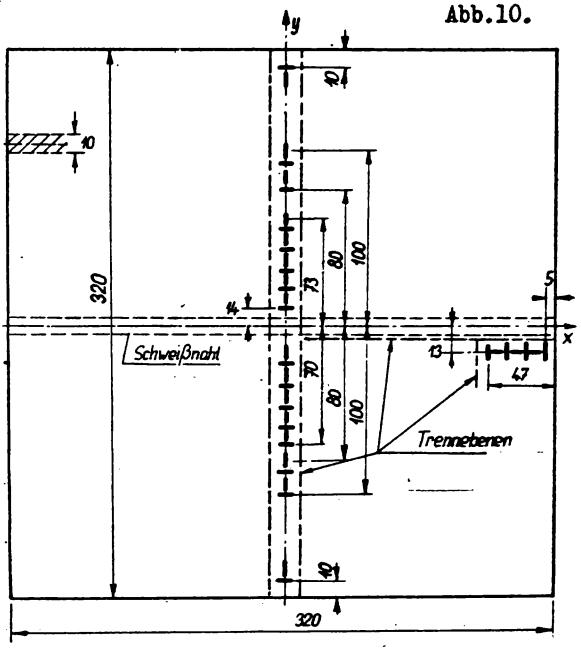


Abb.10.

verteilung zwischen parabolischer und Gleichmässiger Dehnungsverteilung entlang der WEZ.

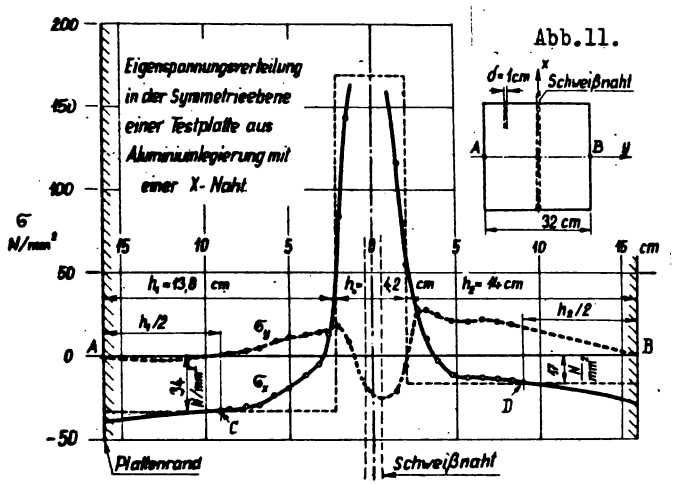
Bei allen diesen Berechnungen ist der Wert von $E\,\varepsilon_0$ offengelassen und h_0 angenommen worden. Sie sollen nun experimentell bestimmt werden. Die dazu benützte Testplatte und ein Beispiel für die Anordnung der DMS zeigt die Abb. 10. Die Messung wurde nach der bekannten Durchtrennmethode [1] durchgeführt, bei dem die Testplatte nach Aufkleben der DMS entlang den in der Abb. 10 gestrichelt eingezeichneten Trennebenen auseinandergesägt wird. Die Differenz der an den DMS vor und nach dem Durchtrennen gemessenen Widerstandswerte ergibt - mit dem k-Faktor multipliziert die zum Eigenspannungszustand gehörende Dehnung.

Am empfindlichsten würde die Messung ausfallen, wenn zur Bestimmung von $E\,\varepsilon_0$ die höchste Spannungsspitze der Eigenspannungsverteilung herangezogen werden könnte. Da diese jedoch an Orten mit hohem Spannungsgradienten liegt, und die Spannungsverteilung an diesen Stellen von zufälligen Schwankungen der Bearbeitung besonders stark beeinflusst wird,

müssen zur Auswertung Spannungswerte von Stellen niedrigem Spannungsgefälle herangezogen werden. Gemäss den Abb. 7 und 8 scheinen dazu die Stellen der Strecke AB in der Mitte des Plattenstreifens ausserhalb der WEZ geeignet zu sein. An dieser Stelle stimmen die σ_x-Werte der tatsächlichen Spannungsverteilung mit den Resultaten der elementaren Berechnung /Gl. (4)/ in guter Annäherung überein, so dass die Messwerte in die Gl. (4) oder (4a) eingesetzt $E\,\varepsilon_0$ ergeben.

Voraussetzung dafür ist jedoch, dass in der Platte keine Biegespannungen senkrecht zur Richtung der Schweissnaht auftreten, die Spannungswerte somit auf der Ober- und Unterseite der Platte übereinstimmen. Im Zweifelsfall müssen somit Messstreifen auf beide Oberflächen der Testplatte aufgeklebt werden und als σ_{x1} bzw. σ_{x2}-Messwerte die Mittelwerte der entsprechenden Spannungswerte auf der Ober- und Unterseite der Platte angesehen werden.

Ein Beispiel für eine durchgeführte Untersuchung zeigt die Abb. 11. und 12. Es handelt sich hierbei um eine Aluminiumlegierung der Type AlZn5Mgl Deckgas-elektrogeschweisst.



Resultate der Auswertung: $E\varepsilon_0 = 194\ N/mm^2$; $h_0 dE\varepsilon_0 = 8{,}4\ kN$

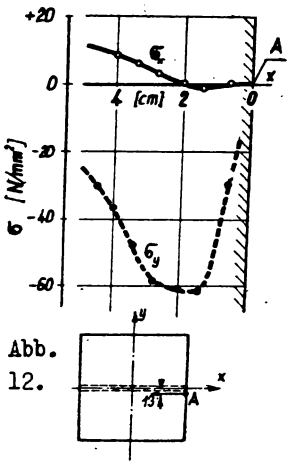
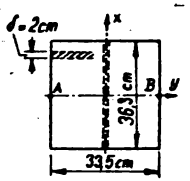


Abb. 12.

Der Wert von h_0 ergab sich aus dem Verlauf der σ_x-Spannungskomponente und wurde etwa durch die grösste Steigung dieser Kurve bestimmt. Der Spitzenwert von σ_x an der Schweissnaht konnte experimentell wegen der nicht definierten Gestalt der Schweissnaht nicht bestimmt werden. $E\,\varepsilon_0$ wurde aus den σ_x-Werten an den Stellen C und D /Abb.11./ durch Einsetzen in Gl. 4a bestimmt werden. Sein Wert

$$E\varepsilon_0 = 194\ N/mm^2$$
$$h_0 \delta E\varepsilon_0 = 352\ kN$$



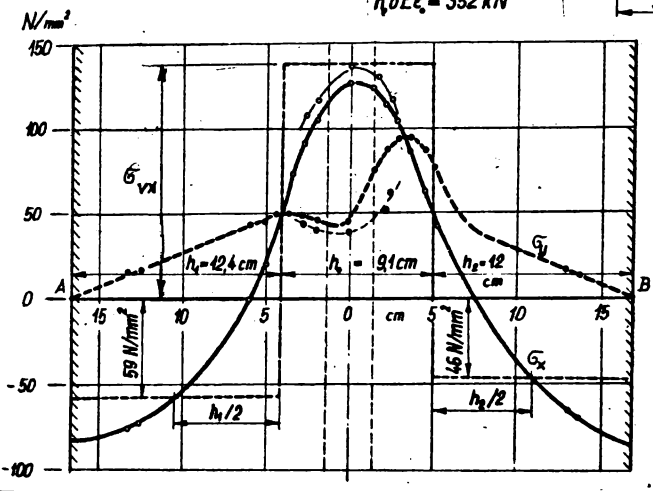


Abb. 13.

und der von $h_0 \delta E \varepsilon_0$ ist in die Abb. 11. eingetragen. Die Spannungsverteilung am Ende der Schweissnaht zeigt die Abb.12. Wie aus der Abbildung ersichtlich, ist σ_x zu klein und σ_y mit einem zu grossen Gefälle behaftet um für die Auswertung zugezogen werden zu können.

Die Verteilung der Eigenspannungen in einer 2 cm dicken Testplatte aus einer Aluminiumlegierung der Type AlMg 4,5 Mn mit von den in der Abb. 10. etwas abweichenden Grundrissabmessungen zeigt die Abb.13. Trotz einer grösseren Breite der WEZ von h_0= 9,1 cm ergab die Auswertung aufgrund der Gl. (4a) einen brauchbaren Wert von $E\,\varepsilon_0$. Zur Kontrolle wurden in der Umgebung der Schweissnaht auch Messtreifen auf die Rückseite der Testplatte aufgeklebt. Die dort gemessenen Spannungswerte sind dünn ausgezogen in die Abb.13. eingezeichnet. Die der Abb.4. entsprechende vereinfachte Spannungsverteilung ist in die Abb. gestrichelt eingezeichnet worden.

3. Eigenspannungen in einer überlappten Klebschicht einer Metallklebverbindung.

Die Eigenspannungen werden hier beim Abbinden durch die von den als vollkommen starr angesehenen Fügeteilen behinderte Schrumpfung des Klebstoffes verursacht. Der Betrag dieses Schrumpfens ist zwar bekannt, verläuft jedoch z.T. in zähflüssigem und irreversibel viskoelastischen Zustand, so dass dessen Eigenspannungen verursachender Anteil $-\varepsilon_0$ auf theoretischer Grundlage kaum zu bestimmen wäre. Die auf den Wert $E\,\varepsilon_0$ / E: E-Modul des ausgehärteten Klebstoffes/ bezogene Spannungsverteilung in der Klebschicht lässt sich aufgrund des Variationsprinzips der Elastizitätslehre bestimmen [15] . Die abgeleiteten Zusammenhänge sind in der Tabelle I zusammengefasst.

Zur Bestimmung von $E\,\varepsilon_0$ wurde in diesem Falle eine spannungsoptische Untersuchung herangezogen, da das als Werkstoff benützte Epoxydharz auch als Klebstoff Verwendung findet. Es kann somit ein annähernd identisches Verhalten von Modellwerkstoff und tatsächlichem Klebstoff vorausgesetzt werden. Als Modell wurde Epoxydharz zwischen Aluminiumbacken eingegossen und dort ausgehärtet. Die dazu benützte Vorrichtung zeigt die Abb.14. Ein Beispiel der aufgenommenen Isochromatenbilder zeigt die Abb.15. Um den Störeinfluss der beim Abbinden des Epoxydharzes neben der Spannungsdoppelbrechung entstehenden Orientierungsdoppelbrechung auszuschalten, wurde die Epoxydschicht von den Aluminiumbacken abgetrennt und die Auswertung

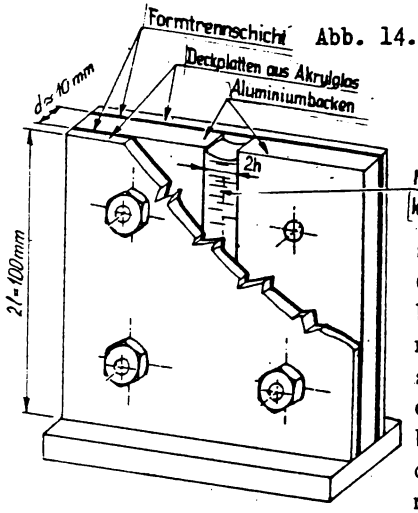
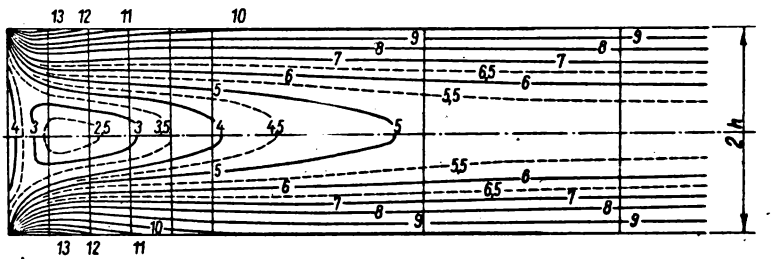


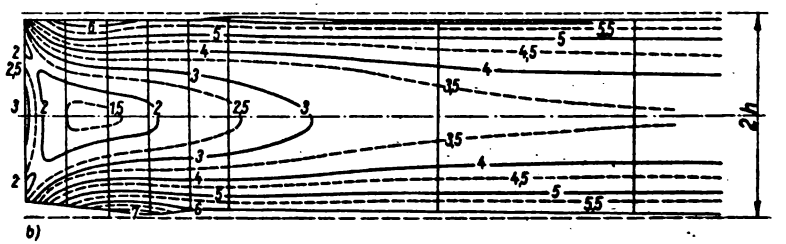
Abb. 14.

aufgrund des Unterschiedes der Isochromatenwerte vor /Abb.15a./ und nach /Abb.15b./ dem Abtrennen durchgeführt. Die so bestimmte Verteilung der Hauptspannungsdifferenz zeigte eine sehr gute Übereinstimmung mit der aus den Formeln der Tabelle I berechneten und ermöglichte nach Eichung des spannungsoptischen Versuches die Bestimmung von $E\varepsilon_0$. Die bei verschiedenen Aushärtebedingungen des Epoxydharzes ermittelten Werte von $E\varepsilon_0$ sind in der Tabelle II zusammengefasst. Die Resultate der Untersuchung ergeben somit ausser den Werten der Eigenspannungen



a)

Abb.15.



b)

Tabelle I.

Lösung für die Spannungsverteilung

für die Verteilung der Eigenspannungen an den Enden einer Klebnaht

Spannungskomponenten

$$\sigma_x = \frac{E\varepsilon_0}{1-\nu}\cdot\frac{1}{1-M}\left[-\frac{K_2}{K_1-K_2}e^{-K_1\xi} + \frac{K_1}{K_1-K_2}e^{-K_2\xi} - 1\right]$$

$$\sigma_y = -\frac{E\varepsilon_0}{1-\nu}\cdot\frac{K_1K_2}{1-M}\left[\left\{\frac{1}{K_1}\frac{\nu}{1-\nu} - \frac{K_1}{2}\left(\frac{1}{3}-\left[\frac{y}{h}\right]^2\right)\right\}e^{-K_1\xi} - \left\{\frac{1}{K_2}\frac{\nu}{1-\nu} - \frac{K_2}{2}\left(\frac{1}{3}-\left[\frac{y}{h}\right]^2\right)\right\}e^{-K_2\xi}\right] - \frac{E\varepsilon_0}{\nu}\frac{M}{1-M}$$

$$\tau_{xy} = \frac{E\varepsilon_0}{1-\nu}\cdot\frac{K_1K_2}{K_1-K_2}\cdot\frac{1}{1-M}\cdot\frac{y}{h}\left[e^{-K_1\xi} - e^{-K_2\xi}\right]$$

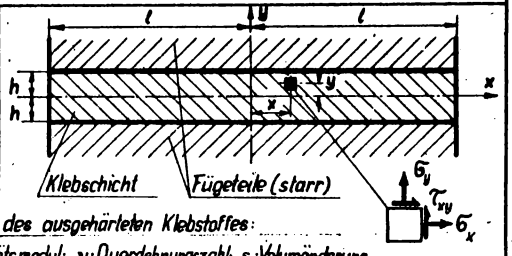
Bezeichnungen

$$M = \frac{1}{7}\left(\frac{\nu}{1-\nu}\right)^2\frac{K_2+K_1}{K_1K_2}$$

$$K_1 = \sqrt{\frac{15}{1-\nu}\left[1+\sqrt{\frac{4+2\nu}{5}}\right]}$$

$$K_2 = \sqrt{\frac{15}{1-\nu}\left[1-\sqrt{\frac{4+2\nu}{5}}\right]}$$

$$\xi = \frac{l-x}{h}$$



Kennzahlen des ausgehärteten Klebstoffes:

E: Elastizitätsmodul; ν: Querdehnungszahl; ε: Volumänderung

auch noch Richtwerte für eigenspannungsarme Härtebedingungen.

Tabelle II.
Härtebedingungen der einzelnen Modelle und die Kennzahlen der Eigenspannungen.

Modell Nr.	Härtetemperatur [K]	[°C]	Nachhärtung	$E\,\varepsilon_o$ [N/mm^2]
1	313	40	nein	≈ 1,2
2	303	30	ja	≈ 3,8
3	293	20	ja	≈ 5,5

Literatur

[1] Birkenfeld W.: Messung von Eigenspannungen mittels Dehnungsmesstreifen. HBM Messtechnische Briefe.3/1968/ S. 27-42.

[2] Thamm F.-Ludvig Gy.-Huszár I.-Szántó I.: A szilárdságtan kisérleti módszerei. /Experimentelle Methoden der Festigkeitslehre/.Müszaki Könyvkiadó. Budapest. 1968.

[3] Keil S.: Eigenspannungsermittlung mittels DMS-Bohrlochrosetten. HBM Messtechnische Briefe. 11/1975/ S.53-58.

[4] Dylag Z.-Orlos Z.: Analiza mozlivosci poltrepanacji wielootworowej w przypadku jednoosiowego stanu naprazénia. Rozprawy Inzinierskie. 8/1960/ 847-869.S.

[5] Oppel G.: Die zerstörungsfreie Ermittlung von Eigenspannungen mittels Härtemessung an der Oberfläche von metallischen Bauteilen. Materialprüfung. 1964. Nr.6. S.6.

[6] Racké H.-Fett Th.: Bestimmung Biaxialer Eigenspannungen in Kunststoff-Oberflächen durch Knoop-Härtemessungen. Materialprüfung. 13/1971/ S.27-43.

[7] Hauk V.: Der gegenwärtige Stand der röntgenographischen Ermittlung von Spannungen. Arch.f.d. Eisenhüttenwesen. 38/1967/ S. 233-240.

[8] Bollenrath F.-Hauk V.-Ohly W.-Preut H.: Eigenspannungen in Zweiphasenwerkstoffen insbesondere nach plastischer Verformung. Z.f. Metallkunde. 60/1969/ S.288-292.

[9] Ignatyeva V.S.: Distribution of inherent stresses in plates butt welded with one pass. Welding Industry. 1956. Nr.3.

[10] Vinokurov V.A.-Grigorjanz A.G.: Theoretical method of evaluating strains and stresses in the welding of plates. IIV-Dokument. Sektion X. Nr.6.3. Moskau.1970.

[11] Nedozeka A.Ya.: The residual stresses in plates when butt welds are made. Avt. Svarka./Russisch/ 1974. Nr.11. S.:32-38.

[12] Thamm F.; Eigenspannungen in Kunststoffen und ihre Messung. Österr. Kunststoff-Zeitschrift. 4/1973/ Nr. 3. S.179-189.

[13] Laermann K.H.: Entwicklung und Bedeutung der Modellstatik in Theorie und Praxis. VDI-Berichte 313/1978/ S.11-21.

[14] Thamm F.: Hybride Methoden der Spannungs- und Verformungsanalyse. Vortrag an der 3.Schule für experimentelle Methoder Festkörpermechanik. Eisenhüttenstadt. 1980.

[15] Thamm F.: Untersuchung der Eigenspannungen in Metallklebverbindungen. Plaste und Kautschuk. 27/1980/ S.451-457.