

Darstellung der Hauptspannlinien an genieteten und geschweissten Konstruktionen

Autor(en): **Kayser, H.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH
Kongressbericht**

Band (Jahr): **2 (1936)**

PDF erstellt am: **21.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-2841>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

V 4

Darstellung der Hauptspannungslinien an genieteten und geschweißten Konstruktionen.

Détermination des trajectoires des contraintes principales dans les constructions rivées et soudées.

The Determination of Lines of Principal Stress in Rivetted and Welded Structures.

Dr. Ing. e.h. H. Kayser,

Professor an der Technischen Hochschule, Vorstand des Ingenieurlaboratoriums
der Techn. Hochschule Darmstadt.

Die technische Entwicklung der Baukonstruktionen, die Überbrückung großer Spannweiten und die damit erforderliche weitgehende Ausnutzung der Werkstoffe bei noch ausreichender Sicherheit verlangt statische Berechnungen, welche die tatsächlich vorhandenen Spannungen im Bauwerk möglichst genau erfassen. Seither wurde meist mit wesentlichen Vereinfachungen gerechnet. Der rechnerisch einfach zu behandelnde einachsige Spannungszustand bildete die Grundlage für die statischen Untersuchungen. Diese Voraussetzung ist nur in den seltensten Fällen wirklich erfüllt, meist handelt es sich um annähernd zweiachsige oder dreiachsige Spannungszustände. Bei Stoß- und Anschlußquerschnitten, bei Rahmenecken und ähnlichen Gebilden wird im Stahlbau zur *genaueren* Erfassung der Normal- und der Schubspannungen zumindest der zweiachsige Spannungszustand angenommen werden müssen.

Die mathematisch rechnerische Ermittlung der Spannungen unter dieser Annahme gestaltet sich infolge der Vielzahl der Randbedingungen schwierig. Es ist dadurch in den meisten Fällen auf diesem Wege noch nicht möglich, eine befriedigende Übereinstimmung zwischen rechnerischen und praktisch auftretenden Spannungswerten zu erzielen, insbesondere, wenn keine einfachen Spannungsfelder vorliegen. Daher erscheint es zweckmäßig durch *Versuche die Spannungsfelder und die Größe der Spannungen in einzelnen, besonders interessierenden Schnitten zu bestimmen*. Aus der genauen Kenntnis der Richtung und der Größe der Spannung werden sich wahrscheinlich für viele praktische Fälle einfache Berechnungsmethoden mit genügender Genauigkeit auch mathematisch herleiten lassen, deren Ergebnis befriedigend mit der praktischen Ausführung übereinstimmt.

Versuche zur Spannungsermittlung der Komponenten des zweiachsigen Spannungszustandes lassen sich auf verschiedene Weise durchführen.

Nach einem älteren Verfahren werden in den Eckpunkten eines in der Spannungsebene liegenden Quadratnetzes die Dehnungen in verschiedenen Rich-

tungen gemessen.¹ Daraus können dann die Hauptspannungen nach Größe und Richtung berechnet und die Hauptspannungslinien eingezeichnet werden.

Im Ingenieurlaboratorium der Techn. Hochschule Darmstadt erfolgte die Darstellung der Hauptspannungslinien mit Hilfe eines rissfähigen Lackes, mit welchem die zu untersuchenden Versuchskörper überzogen wurden.²

Bei der Belastung eines so vorbereiteten Versuchsstückes reißt der Lack senkrecht zur Richtung der größten Dehnungen und es entsteht eine Rißlinienschar, welche der *einen* Schar der Hauptspannungslinien entspricht. Mit Hilfe der bekannten Bedingung, daß sich beide Scharen der Hauptspannungslinien unter 90° schneiden müssen, läßt sich die *zweite* Schar in das gewonnene Spannungsfeld einzeichnen. Nach der Entwicklung der Hauptspannungslinien werden in einigen Meßpunkten der maßgebenden Schnitte in Richtung der gefundenen Rißlinien Dehnungsmessungen ausgeführt und die Größe der Hauptspannungen in diesen Punkten errechnet.³

Das Feld der Hauptspannungslinien bietet einen anschaulichen Einblick in die Verformung und in die Spannungsverteilung an einem Versuchskörper oder Bauteil. Schon aus dem Verlauf und der Form der Rißlinien können in vielen Fällen wichtige Schlüsse gezogen werden. Eine stark ungleichmäßige Verteilung der Hauptspannungslinien zeigt unabhängig von den Messungen die Lage der hochbeanspruchten Stellen an und erleichtert die Wahl der Meßquerschnitte. Eine weitere genaue Beurteilung der Beanspruchung vermittelt das auf Grund der Hauptspannungslinien gewonnene Spannungsbild. Aus seiner Kenntnis können dann die für eine zutreffende Berechnung erforderlichen Annahmen erhalten werden.

Da der Lack aber noch die weitere Eigenschaft hat Fließerscheinungen sehr frühzeitig durch feine Splitterungen anzuzeigen, so vermittelt er auch einen guten Überblick über das plastische Verhalten des untersuchten Bauteils. Schon im Bereich der nach den üblichen Methoden berechneten Nutzlast können einzelne in geringem Maße schon plastisch verformte Zonen gefunden werden, die ohne dieses Hilfsmittel sich jeder Beobachtung entziehen. Des weiteren läßt sich bei einer Steigerung der Last deutlich und übersichtlich das Ausbreiten dieser Fließgebiete erkennen. Die Darstellung der Hauptspannungslinien läßt sich in gleicher Weise an ebenen und räumlichen Gebilden selbst großer Abmessung ermöglichen, wenn die notwendigen Versuchsbedingungen eingehalten werden können. Damit ist als Ausgangspunkt für die Entwicklung neuer Berechnungsmethoden der Versuch am praktisch ausgeführten Bauwerk oder unter Umständen an einem Modell in mäßigem Verkleinerungsmaßstab getreten und die Untersuchung läßt sich am gleichen Material durchführen, aus welchem auch das Bauwerk selbst erstellt wird.

Im Folgenden sollen an einer Reihe verschiedener Bauteile die unter der Versuchslast entwickelten Hauptspannungslinien besprochen werden. Fig. 1 zeigt diese Linienscharen an einfachen Zugstäben mit exzentrischem Kraftangriff. Wie man daraus ersehen kann, wurde der geschweißte Stumpfstoß untersucht, dann der Stumpfstoß mit anliegender Lasche, angeschlossen durch Stirnnähte

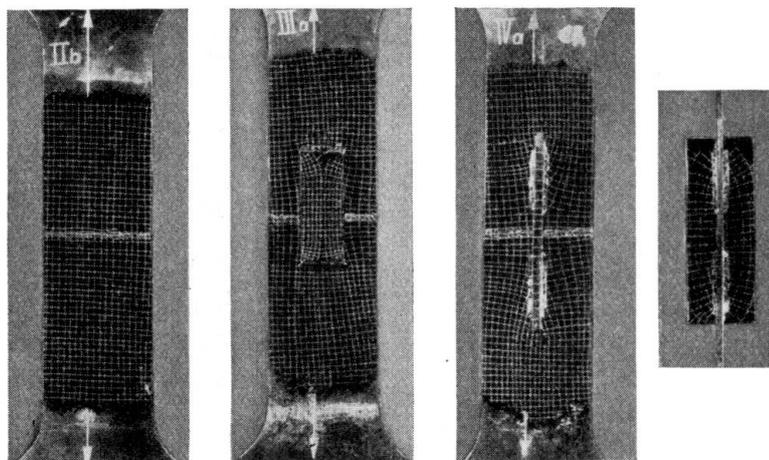
¹ Vgl. Wyss: Kraftfelder in festen elastischen Körpern.

² Vgl. Bautechnik 1936, Heft 23.

³ Vgl. Dehnungslinienverfahren der Fa. Maybach.

und schließlich der Stumpfstoß mit stehender Lasche, deren Anschluß durch Flankennähte erfolgt war.

Für sämtliche Versuchsstäbe ergaben sich verhältnismäßig einfache Spannungsfelder. Bei dem ersten dieser Stäbe, dem einfach stumpf gestoßenen Stab, traten Rißlinien *senkrecht* zur Stabachse auf, die sich auch unter Annahme eines nahezu einachsigen Spannungszustandes aus Überlegung leicht finden lassen. Der zweite untersuchte Stab zeigt im Kraftlinienbild aber schon deutlich den Einfluß der aufgeschweißten Verstärkung, wie sich aus dem Abwandern der Linien zur Lasche hin erkennen läßt. Besondere Beachtung verdient hierbei der Verlauf der Hauptspannungslinien auf der Lasche selbst. In der Nähe der Stirnnaht findet sich ein sehr ungleichmäßiger Verlauf. Alle Linien strömen



Nutzlast
 $P = 11,40 \text{ t}$ $P = 15,20 \text{ t}$ $P = 15,55 \text{ t}$

Fig. 1.

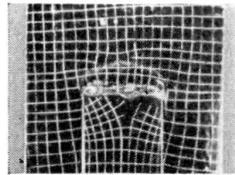
Ausbildung von Stößen. Darstellung der Spannungstrajektorien bei Nutzlast.

zu den Ecken der Stirnnaht hin, während deren Mitte entlastet ist. Weiterhin hat sich vor der Naht im Blech eine bogenförmige Fließfigur gebildet, welche auf sehr hohe Spannungen in dieser Zone schließen läßt. Diese örtliche, schon unter Nutzlast eingetretene Fließerscheinung könnte wohl auch die Ursache für die geringe Dauerfestigkeit derartiger Anschlüsse sein, deren Dauerbruchformen ähnlich verlaufen.⁴ Im wesentlichen das gleiche Ergebnis wurde für den dritten Versuchsstab Fig. 1 erhalten. Auch hier beteiligt sich die Lasche, trotzdem ihre Querschnittsteile teilweise weit vom Stab abliegen, im Mittelschnitt gleichmäßig an der Kraftübertragung, wie auch durch Dehnungsmessungen nachgewiesen werden konnte. An der Stirnseite war diese Lasche bei der Schweißung geheftet. Bei der Untersuchung bildeten sich, von den Heftpunkten ausgehend, ebenfalls wieder Splitterungen im Lack aus, welche deutlich auf Fig. 2 zu erkennen sind, und die Fließzonen unterhalb der Nutzbelastung kennzeichnen. Bei der Bruchbelastung dieser Versuchsstäbe, deren Ergebnis Fig. 3 darstellt, zeigt sich die Ausbreitung der Fließzonen in dem Bruchgebiet. Der stumpf gestoßene Stab

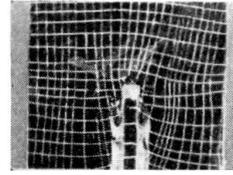
⁴ Dr. Ing. Kommerell: Erfahrungen bei ausgeführten Bauwerken in Deutschland (III d 6 Vorbericht des II. Kongresses der Internationalen Vereinigung für Brückenbau und Hochbau, Berlin-München 1936).

läßt im Fließbild eine viel größere Ausdehnung des Fließens der einen im Vergleich zur anderen Seite infolge exzentrischer Belastung erkennen. Charakteristisch für die Überschreitung der Fließgrenze bei Zug sind die unter 45° verlaufenden Lacksplitterungen, die durch die Ausbildung von Gleitflächen bedingt sind.

Der Verlauf der Hauptspannungslinien an Druckstücken, welche mit der Anwendung zweier Verbindungsmittel für Stabanschlüsse hergestellt sind, wird durch Fig. 4 gezeigt.



$P = 15,20 \text{ t}$

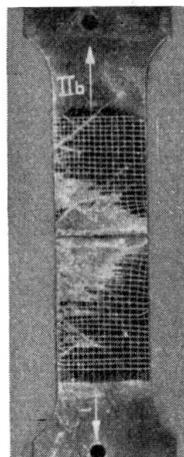


$P = 15,55 \text{ t}$

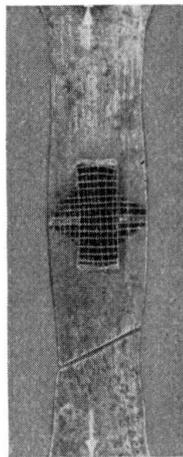
Fig. 2.

Ausbildung von Stößen. Fließfiguren in Lack bei Nutzlast.

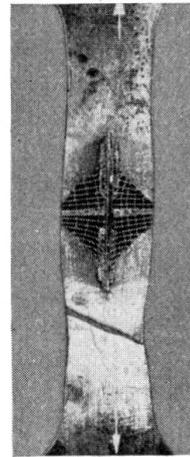
Bei einem dieser Körper wurde das Blech an den I-Stab angeschweißt, bei einem zweiten angenietet und bei einem dritten geschweißt und genietet. Nach der Entwicklung der Hauptspannungslinien wurden Spannungsfelder in den Blechen erhalten, wie sie die Fig. 4 darstellt. Die Länge der Anschlußschweißnähte ist beim ersten und dritten Druckkörper durch Punkte gekennzeichnet.



$P_B = 46,80 \text{ t}$



$P_B = 66,78 \text{ t}$



$P_B = 67,53 \text{ t}$

Bruchlast

Fig. 3.

Ausbildung von Stößen. Bruchbilder für statische Belastung.

Die geschweißte Ausführung des Anschlusses ergab eine sehr unregelmäßige Eintragung der Kräfte in die Naht. Fast alle Spannungslinien laufen auf den Nahtbeginn zu, der dann hohe Spannungen aufweisen muß. Ein schon wesentlich ausgeglicheneres Spannungsfeld erbrachte die genietete Ausführung dieser Stäbe. Aber erst bei der Verwendung von Nietung und Schweißung wurde ein gleichmäßig gestreckter Verlauf der Kraftlinien erzielt, der auf gleichzeitige Beteiligung beider Verbindungsmittel an der Kraftübertragung schließen läßt.

Anschaulich und den bekannten Darstellungen entsprechend ließ sich der Verlauf der Trajektorien an einem Biegeträger von einem Verhältnis $h : l = 1 : 10$ entwickeln. Fig. 5 zeigt das Ergebnis dieses Versuches. Der Träger war in der Mitte in 500 mm Entfernung durch zwei Einzellasten belastet; die Stützweite betrug 3000 mm. Im Mittelfeld herrscht dann konstantes Moment ohne Quer-

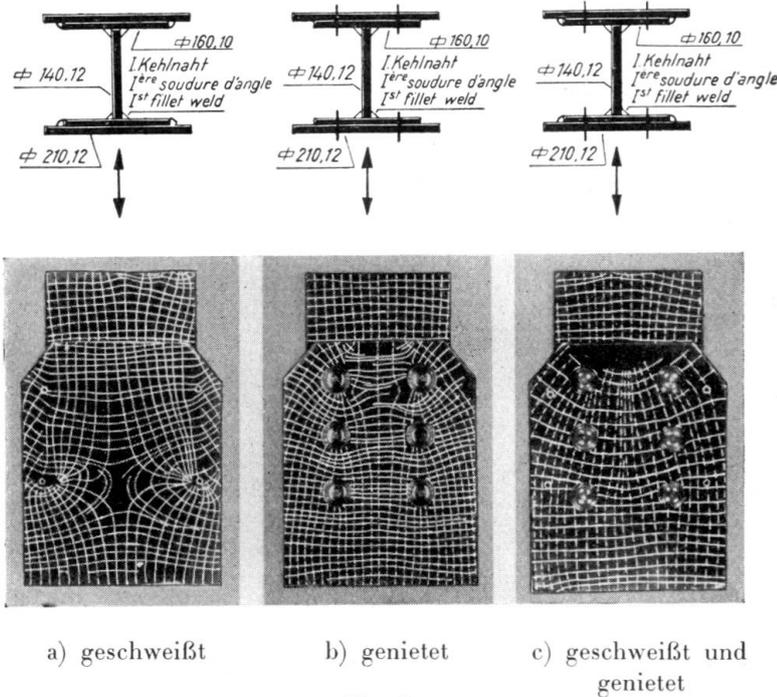


Fig. 4.
Druckversuche II.

Spannungstrajektorien an geschweißten und kombinierten Körpern. Vorderansicht.

kraft, während in den Endfeldern beide zusammenwirken. Die entwickelten Linien zeigen diese statischen Verhältnisse durch ihre Form genau an. Während sich aus der Rechnung für die Schubspannung in halber Stegblechhöhe im Mittelfeld der Wert Null ergibt, erreicht er im Endfeld ein Maximum. Dies bedeutet, daß im ersteren die Linien die Trägerachse in einem Winkel von 90° schneiden, dagegen im Endfeld mit dieser einen Winkel von 45° einschließen. Zwischen den beiden Feldern ergab sich eine Übergangszone. Diese wird sich vermutlich immer in solchen Fällen ergeben, wo statisch ein schrofferer Übergang von der einen in die andere Beanspruchungsart erfolgt. Bei höherer Belastung bildeten sich im Mittelfeld wieder die Splitterungen im Lacküberzug heraus, welche das Fließen des Materials anzeigen. Trotzdem über die Länge des ganzen Feldes konstantes Moment wirkt, also

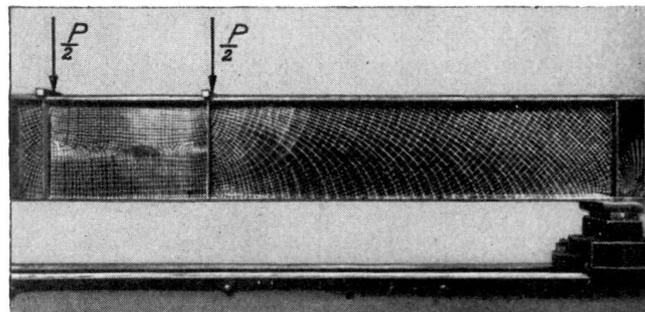


Fig. 5.
Spannungstrajektorien an einem Biegeträger. $h : l = 1 : 10$.

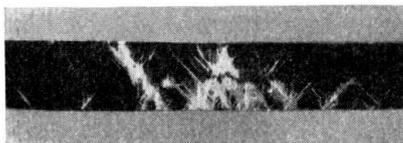
alle Querschnitte gleich hoch belastet sein sollten, erreichten einige Gebiete die Fließgrenze früher als andere (vgl. Fig. 6). Bemerkenswert ist auch die Beobachtung, daß in der Druckzone die Ausbildung der *Fließerscheinungen* senkrecht zur Druckrichtung, dagegen in der Zugzone unter 45° gegen die Zugrichtung geneigt auftrat. Im wesentlichen gleiche Feststellungen ließen sich an dem gedrückten und dem gezogenen Flansch des Mittelfeldes machen.



Draufsicht



Vorderansicht



Untersicht

Fig. 6.

Fließzonen in der Mitte eines
Biegeträgers.

Es scheint demnach, daß in diesem Falle in der Zugzone die Zerstörung durch Überschreitung der Schubfestigkeit eingeleitet wird, während sich in der Druckzone eine andere Zerstörungsform, wahrscheinlich durch Erreichen der Druckfestigkeit ausbildete, in dem bei Zug die Schubfließgrenze, bei Druck die Druckfließgrenze maßgebend ist. Betont sei jedoch, daß diese Betrachtungen bisher erst an wenigen Versuchsteilen gemacht wurden und das Ergebnis noch durch weitere Versuche bestätigt werden müßte.

Eine weitere Fig. 7 beweist für einen kurzen Träger von einem Verhältnis $h:l = 1:4$ die Erschöpfung der Tragfähigkeit des Stegbleches durch Schub. Die auf der Fig. 7 entwickelten Hauptspannungslinien waren etwa unter Nutzbelastung erzeugt. Es erschienen schon bei der Nutzbelastung Fließzonen in der Nähe der Lasteintragungspunkte und der Auflager. Diese wuchsen mit steigender Last in Form von Gleitflächen von den Ausgangspunkten ausgehend immer weiter in das Endfeld hinein und waren 45° gegen die Richtung der Hauptspannungslinien geneigt, zeigten also deutlich die Schubzerstörung des Trägers.

Eine eingehende Spannungsuntersuchung beschäftigt sich mit einem Versuchsrahmen. In den Rahmenstielen ließen sich die Hauptspannungslinien in der erwarteten Art und Weise aufzeigen (vgl. Fig. 8). Besondere Beachtung wurde bei diesem Versuch dem Linienverlauf im Bereich der Ecken geschenkt. Es fällt bei der Betrachtung der Rahmenecke eine Unsymmetrie der Linien zum Diagonalschnitt auf. An einem *Vergleichsstabeck* mit Rechteckquerschnitt und symmetrischer Belastung ergaben sich regelmäßige symmetrische Kurven, wie Fig. 9 zeigt, die mit den spannungsoptisch von *Cardinal v. Widdern*⁵ erhaltenen Kurven übereinstimmen. An der *Rahmenecke* ist eine Verschiebung der Kurven nach dem Riegel hin zu erkennen. Die Ursache hierfür ist in der verschiedenen Belastungsweise von Stiel und Riegel zu suchen. Im ersteren wirkt Querkraft und Moment, im letzteren dagegen Längskraft und Moment. Die Untersuchung wurde inzwischen durch eingehende Dehnungsmessungen in einer Reihe von

⁵ *Cardinal v. Widdern*: Mitteilungen des Mech.-Techn. Laboratoriums der Technischen Hochschule München.

Meßquerschnitten ergänzt und diese unter Annahme des zweiachsigen Spannungszustandes in Normal- und Schubspannungen umgerechnet. Die Auswertung der Meßergebnisse und die Zusammenstellung der gewonnenen Erkenntnisse wird in einer besonderen demnächst erscheinenden Veröffentlichung niedergelegt.

Zum Vergleich verschiedener Ausführungsformen wurde der Rahmen mit zwei Eckausbildungen hergestellt. Die eine Seite erhielt ein gegenüber dem Stegblech des Stieles verstärktes Eckblech, während die andere ausgesteift wurde. Die Änderung des Verlaufs der Hauptspannungslinien gibt Fig. 10 an. Am Ende der kurzen Aussteifung zeigte sich ein Knick in den Linien, welcher eine Verteilung der Spannungen auf die Höhe des Stegbleches erwarten läßt und auf eine Entlastung der inneren Eckzone hindeutet. Gleichzeitig ließ sich eine gute Stützung des inneren Flansches der ausgesteiften Ecke im Gegensatz zur anderen durch die Entwicklung der Linien auf dem Flansch in der inneren Rundung nachweisen.

In Fig. 11 sind die Hauptspannungslinien auf der Innenseite des inneren Flansches einer unausgesteiften und einer ausgesteiften Ecke gegenübergestellt.

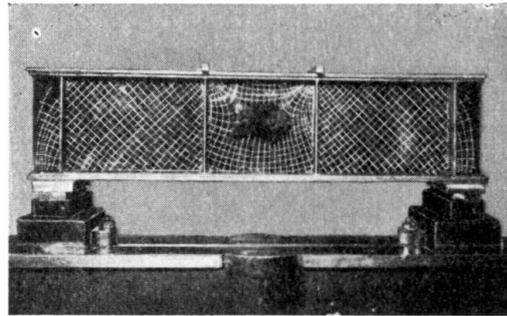


Fig. 7.
Spannungstrajektorien an einem Biegeträger.
 $h:l = 1:4$.

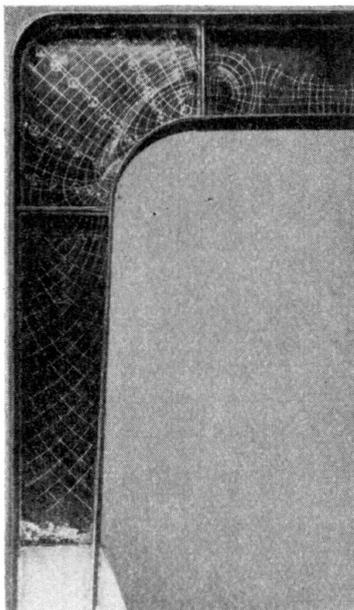


Fig. 8.
Spannungstrajektorien an einem Rahmen
mit I-Querschnitt.

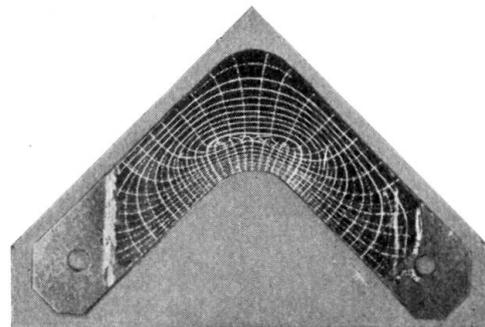
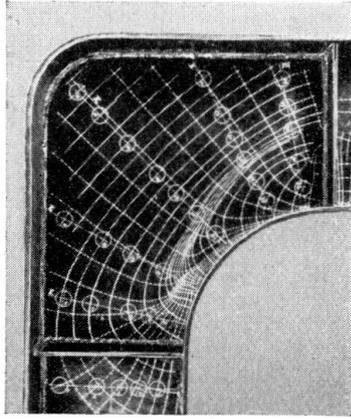


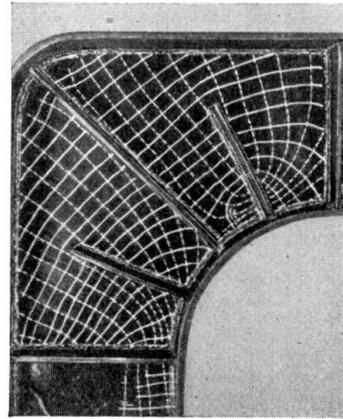
Fig. 9.
Spannungstrajektorien an einem Stabeck
mit Rechteckquerschnitt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß sich durch die Entwicklung der Spannungsfelder, der Fließzonen und -Gebiete ein anschaulicher Überblick über das Verhalten der untersuchten Bauteile und Bauelemente ergibt. Die Aus-

messung der Spannungsfelder vermittelt des weiteren einen Einblick in die Größenverhältnisse und die Verteilung der Spannungen insbesondere des zweiachsigen Spannungszustandes. Aus diesen Versuchsergebnissen werden sich wahrscheinlich Möglichkeiten finden lassen, schon bestehende Berechnungsweisen für den zweiachsigen Spannungszustand zu berichtigen und mit den tatsächlichen



Ecke a: Verstärktes Eckblech.

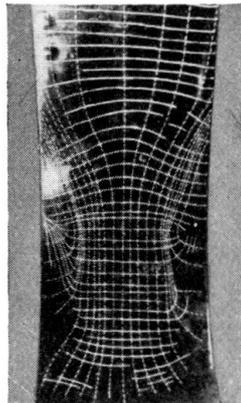


Ecke b: Unverstärktes Eckblech mit Aussteifungen.

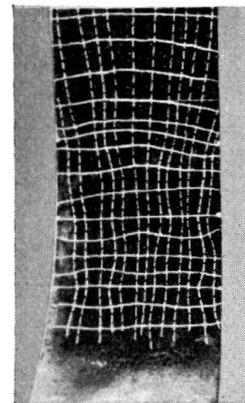
Fig. 10.

Vergleich des Trajektorienverlaufes von zwei Rahmenecken.

Werten in Übereinstimmung zu bringen. Ebenso werden sich daraus die grundlegenden Annahmen richtig beurteilen lassen, welche für die rechnerische Vorbestimmung der verschiedenen kennzeichnenden Spannungswerte erforderlich sind.



Ecke a: Verstärktes Eckblech.



Ecke b; Unverstärktes Eckblech mit Aussteifungen.

Fig. 11.

Trajektorienverlauf auf dem Innenflansch einer Rahmenecke.

Das Ziel dieser Untersuchungen muß aber immer die Auffindung für die Praxis brauchbarer, d. h. einfacher und allgemein gültiger Berechnungsverfahren sein, die weitgehend mit den wirklich auftretenden Verhältnissen übereinstimmen und dem Konstrukteur die Möglichkeit geben bei ausreichender Sicherheit wirtschaftliche Bauwerke zu erstellen.