

469 | Oktober 1986

## SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

Wolfgang Fricke

### Rißfortschrittsuntersuchungen an versteiften Plattenfeldern

**TUHH**

*Technische Universität Hamburg-Harburg*

## **Rißfortschrittsuntersuchungen an versteiften Plattenfeldern**

Wolfgang Fricke, Hamburg, Technische Universität Hamburg-Harburg, 1986

ISBN: 3-89220-469-1

© Technische Universität Hamburg-Harburg  
Schriftenreihe Schiffbau  
Schwarzenbergstraße 95c  
D-21073 Hamburg

<http://www.tuhh.de/vss>

INSTITUT FÜR SCHIFFBAU DER UNIVERSITÄT HAMBURG

Bericht Nr. 469

Rißfortschrittsuntersuchungen an  
versteiften Plattenfeldern

von

Wolfgang Fricke

Oktober 1986

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Versuche zum Rißfortschrittsverhalten versteifter Plattenfelder</b>	<b>4</b>
2.1	Versuchsplanung und Versuchsaufbau . . . . .	4
2.2	Modellgeometrie . . . . .	5
2.3	Werkstoffeigenschaften . . . . .	8
2.4	Versuchsvorbereitung und Meßwerterfassung . . . . .	9
2.5	Versuchsdurchführung . . . . .	10
2.6	Ermittelter Rißverlauf . . . . .	12
2.7	Weitere Versuchsergebnisse . . . . .	14
2.8	Ermittlung der Rißfortschrittsgeschwindigkeit . . . . .	16
<b>3</b>	<b>Ermittlung der Spannungsintensitätsfaktoren</b>	<b>17</b>
3.1	Finite-Element-Idealisierung . . . . .	18
3.2	Zur Berechnung der Spannungsintensitätsfaktoren . . . . .	19
3.3	Ergebnisse der Berechnung . . . . .	20
<b>4</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse</b>	<b>21</b>
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Schlußfolgerungen</b>	<b>23</b>
<b>6</b>	<b>Literatur</b>	<b>25</b>

# 1 Einführung

Die Stahlkonstruktion eines Schiffes ist wie viele andere Konstruktionen ermüdungsgefährdet. Aufgrund der dynamischen Beanspruchung aus der Seegangswirkung, aus der wechselnden Beladung sowie aus anderen Laständerungen können Ermüdungsrisse entstehen, die sich nicht mit letzter Sicherheit ausschließen lassen. Besonders gefährdet sind konstruktive Details, bei denen die Kerbwirkung oder die Lasteinflüsse falsch eingeschätzt wurden oder bei denen durch die Fertigung Imperfektionen eingebracht wurden.

Durch eine zerstörungsfreie Prüfung im Anschluß an die Fertigung und durch regelmäßige Inspektionen in Abständen von i.a. vier Jahren wird sichergestellt, daß Risse rechtzeitig vor Erreichen einer kritischen Länge entdeckt und ausgebessert werden, so daß in dieser Hinsicht die Konstruktion eine hohe Zuverlässigkeit besitzt.

Eine recht interessante Zusammenstellung von Rissen, die bei Inspektionen gefunden wurden, enthält /1/. Die meisten Risse wurden an den üblichen konstruktiven Diskontinuitäten entdeckt und wiesen i.a. eine Länge von maximal 100 mm auf. Längere Risse von bis zu 500 mm Länge wurden dagegen vornehmlich an Stellen mit Fertigungsfehlern sowie an konstruktiven Details gefunden, bei denen die Beanspruchungen während der Konstruktionsphase nicht oder nur unzureichend berücksichtigt wurden.

Bei den genannten Schäden ist eine Reparatur i.a. unumgänglich. Manchmal sind zusätzliche konstruktive Maßnahmen notwendig, damit die wirkende Belastung in besserer Weise aufgenommen wird und nicht innerhalb des folgenden Inspektionsintervalls wieder zu den gleichen Schäden führt.

Bei kleineren Schäden stellt sich jedoch häufig die Frage nach der Risikoeinschätzung und nach der Notwendigkeit einer sofortigen Reparatur. Beispiele für derartige Fragestellungen sind:

- Welches Ausmaß können kleinere fertigungsbedingte Risse während der vorgesehenen Nutzungsdauer erreichen?
- Müssen zwischen den Inspektionen entdeckte Risse sofort repariert werden?
- Können kleinere Risse, die bei einer Inspektion nicht entdeckt wurden, bis zur nächsten Inspektion eine kritische Länge erreichen?

Während die ersten beiden Fragen das Tolerieren bestimmter Fehler beinhalten, spielt die letzte Frage auf die Entdeckbarkeit von Fehlern bei Inspektionen an und auf den damit verbundenen Zeitraum zwischen den Inspektionen.

Grundsätzlich sollte die Fehlereinschätzung auf bruchmechanischer Basis unter Berücksichtigung der jeweiligen Randbedingungen erfolgen, wobei sowohl das stabile Rißfortschrittsverhalten als auch die Möglichkeit des plötzlichen instabilen Bruchs zu beachten ist.

Zum Rißfortschritts- und Bruchverhalten von Stahlkonstruktionen existiert eine inzwischen fast unüberschaubare Anzahl von Untersuchungen. Die überwiegende Mehrzahl beschäftigt sich allerdings mit den werkstoffmechanischen Grundlagen sowie mit kleineren Rissen, z.B. um die Toleranzgrenze von Fertigungsfehlern festzulegen oder die Gefahr des Durchschlagens von Rissen in Dickenrichtung von Wänden zu ermitteln.

Große flächenartige Strukturen wie die versteiften Plattenfelder (Paneele) einer Schiffskonstruktion waren dagegen seltener Gegenstand von Untersuchungen. In /2/ ist eine Übersicht über einige Arbeiten zu versteiften Plattenfeldern gegeben. Hauptsächlich wurden Platten aus Aluminiumlegierungen mit genieteten Steifen betrachtet, wie sie im Flugzeugbau Anwendung finden. Bemerkenswert ist die Untersuchung in /3/, in welcher das stabile Rißfortschrittsverhalten von Platten mit genieteten und mit fest verbundenen Steifen (Integralsteifen) verglichen wird. Danach bewirken genietete Steifen eine erhebliche, Integralsteifen dagegen nur eine geringere Verzögerung des Rißwachstums. Es wird eine Methode zur Abschätzung der Rißfortschrittsgeschwindigkeit angegeben. Das instabile Bruchverhalten angerissener Paneele ist u.a. in /4/ untersucht worden.

Ergebnisse neuerer bruchmechanischer Berechnungen für schiffbauliche Paneele enthält /5/. Nach diesen Berechnungen beeinflussen die Steifen die Rißfortschrittsgeschwindigkeit und die Restfestigkeit erheblich.

In der Zwischenzeit haben die numerischen Methoden in der Bruchmechanik einen Stand erreicht /6-7/, der eine rechnerische Behandlung von sehr komplexen Geometrien erlaubt. Die damit ermöglichte genauere Vorhersage des Rißfortschritts bedarf jedoch weiterhin einer Absicherung durch einzelne Versuche, wobei derzeit Fragen zum auftretenden Rißpfad und zum Einfluß verschiedener Parameter wie z.B. Vorverformungen und Eigenspannungen im Vordergrund stehen. Außerdem stellt sich bei komplexen Geometrien die Frage nach dem erforderlichen Modellierungsaufwand für die Berechnung.

Entsprechend diesen Fragestellungen soll das vorliegende Vorhaben zur weiteren Klärung des Rißfortschrittsverhaltens von versteiften Plattenfeldern dienen. An zwei großen Ver-

suchsmodellen mit unterschiedlichen Rißausgangsstellen (Rißstarter) wird der Rißpfad und Rißfortschritt unter dynamischer Längsbelastung mit konstanter Amplitude untersucht. Parallel durchgeführte Berechnungen nach der Methode der finiten Elemente ermöglichen Betrachtungen zur Korrelation mit anderen Ergebnissen und zur rechnerischen Vorhersage des Rißfortschritts.

Auf der Grundlage der erzielten Ergebnisse können Fragen zur Tolerierbarkeit entdeckter Risse, wie sie oben angesprochen wurden, mit größerer Sicherheit beantwortet werden. Hinsichtlich der Berücksichtigung von veränderlichen Belastungsamplituden dürften die an Kleinproben gefundenen Gesetzmäßigkeiten übertragbar sein. Bestehende Unsicherheiten oder streuende Einflußgrößen lassen sich mit Hilfe der Zuverlässigkeitstechniken rational beurteilen. Eine Anwendung der Zuverlässigkeitstechniken auf den Rißfortschritt in versteiften Plattenfeldern ist parallel zu dem hier beschriebenen Vorhaben durchgeführt worden und in /8/ veröffentlicht.

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Sonderforschungsbereiches 98 "Schiffstechnik und Schiffbau" entstanden.

Den Mitarbeitern am Institut für Schiffbau, die an der Durchführung des Vorhabens beteiligt waren, sei an dieser Stelle gedankt, insbesondere auch Herrn Dr.- Ing. H. Paetzold für die Betreuung der parallel durchgeführten Rißfortschrittsuntersuchungen an Kleinproben (Kapitel 2.3).

## **2 Versuche zum Rißfortschrittsverhalten versteifter Plattenfelder**

In diesem Kapitel werden die beiden durchgeführten Versuche im einzelnen beschrieben, beginnend mit dem gewählten Versuchsaufbau und der Modellgeometrie sowie den Werkstoffeigenschaften der verwendeten Schiffbaustähle und anschließend mit dem Vorgehen bei der Versuchsdurchführung und der Meßwerterfassung. Abschließend werden die Ergebnisse vorgestellt. Eine Diskussion der Ergebnisse folgt nach der Darstellung der begleitenden Berechnungen im Kapitel 4.

### **2.1 Versuchsplanung und Versuchsaufbau**

Es bestand die Absicht, die Versuche an einem möglichst breiten versteiften Plattenfeld mit Abmessungen durchzuführen, wie sie üblicherweise in der Schiffskonstruktion vor-

zufinden sind.

Allerdings waren die Grenzen zu beachten, die durch die vorhandenen Versuchseinrichtungen am Institut für Schiffbau vorgegeben waren:

- hinsichtlich der Geometrie die Abmessungen der großen Festigkeitsversuchsanlage und
- hinsichtlich der Belastungen die verfügbaren zwei 1000 kN- Hydraulikzylinder.

Nach eingehenden Vorüberlegungen wurde ein Versuchsaufbau gewählt, der es durch eine Hebelübersetzung ermöglicht, etwa die doppelte Kraft in das versteifte Plattenfeld einzuleiten, Bild 1 und Bild 2. Dabei wirkt die Druckkraft aus den beiden 1000 kN-Zylindern über ein Querhaupt auf das obere Ende von vier Vertikalträgern. Diese sind an ihrem unteren Ende drehbar gelagert und übertragen aufgrund der Hebelwirkung die doppelte Kraft in die auf halber Höhe angeordnete Lastverteilungsplatte und in das Versuchsmodell. Über das am anderen Ende vorhandene Widerlager der großen Festigkeitsversuchsanlage schließt sich der Kraftfluß.

Der gewählte Versuchsaufbau erforderte mehrere verschiebbliche und drehbare Lager, die jeweils nur Druckkräfte und keine Querkräfte oder Biegemomente übertragen sollten. Die Lager wurden vor Versuchsbeginn sorgfältig ausgerichtet und während des Versuches regelmäßig überwacht.

Mit dem Versuchsaufbau konnten maximal etwa 4000 kN in das Modell eingeleitet werden. Um die einer angemessenen Versuchsdauer entsprechende Reißfortschrittsgeschwindigkeit schon bei kleiner Anfangsrißlänge zu erzielen, wurde eine maximale Nennspannung von etwa  $150 \text{ N/mm}^2$  für erforderlich angesehen. Dadurch ergab sich eine Begrenzung der Querschnittsfläche des Modells auf höchstens etwa  $25.000 \text{ mm}^2$ .

## 2.2 Modellgeometrie

Das Aussehen der Versuchsmodelle ist bereits aus den Bildern 1 und 2 ersichtlich. Als Reißausgangspunkt war die Steife 1 in der Modellmitte vorgesehen. Das Reißfortschrittsverhalten sollte über einen Bereich von etwa 50% - 60% der Plattenbreite beobachtet werden. Bei der maximal zu erreichenden Reißlänge sollten die drei mittleren Steifen 1, 2a und 2b durchtrennt sein. Die Restbreite und die äußeren Steifen dienten zur Begrenzung des Randeinflusses und zur Verhinderung des Eintretens eines instabilen Restbruches.

In Bild 3 sind die konstruktiven Einzelheiten der beiden Versuchsmodelle gezeigt, wobei nur ein Viertel der versteiften Platte dargestellt ist.

Als Plattendicke wurden 8 mm bzw. 7 mm gewählt. Die Steifen sind im Abstand von 420 mm angeordnet. Als Profil wurde für die drei mittleren Steifen ein für die Schiffskonstruktion typisches Flachwulstprofil HP 120 x 7 nach DIN 1019 ausgewählt. Die äußeren Profile wurden vereinfachend aus dem etwa flächengleichen Flachstahl 100 x 10 gefertigt.

Die sich damit ergebende Querschnittsfläche erfüllt die oben genannte Forderung. Mit dem gewählten Steifenabstand und der Profilstärke ist ein schwaches Paneel einer Schiffskonstruktion etwa im Originalmaßstab nachgebildet. Für die stärkeren Paneele größerer Handelsschiffe ergibt sich ein Maßstabsfaktor von 2 bis 2.5. Das vorliegende Verhältnis aus Profilhöhe zu Steifenabstand von 1 : 3.5 ist typisch für schiffbauliche Paneele.

Anrißgefährdet sind bei versteiften Plattenfeldern besonders die Stöße bzw. Verbindungen zwischen den in endlicher Länge angelieferten Profilen. Aus dem Grund wurde an der mittleren Steife 1 auf halber Modelllänge ein typischer Profilstoß mit üblicher Verschweißung angeordnet. Im unteren Stegbereich befindet sich ein Abschweißloch, das eine einwandfreie Verschweißung der Profilenenden ermöglichen soll. Als mögliche Anrißstellen werden nach vorlaufenden Untersuchungen /9/ der Nahtübergang am Rand des Abschweißloches zur Platte und der verschweißte Wulst mit eventuellen inneren Fehlern gesehen. An diesen Stellen wurden bei den beiden Modellen die Rißstarter angeordnet, Bild 3 oben.

Um den Rißfortschritt in der Platte besser verfolgen zu können, wurde entschieden, in der Platte keinen Schweißstoß anzuordnen. Ausgehend vom Rande des Abschweißloches hätte sich zwar der Riß in der Platte im Abstand von etwa 20 mm zu einem eventuell vorhandenen Plattenstoß ausgebreitet. Im weiteren Versuchsablauf wäre allerdings ein Überwechseln zur Wärmeübergangszone eines Plattenstoßes möglich gewesen. Eine optische Verfolgung des Risses hätte dort auf einfache Weise nicht mehr durchgeführt werden können.

Die Steife 2a/b enthält beim ersten Modell ebenfalls einen Profilstoß mit Abschweißloch, an dem das Rißfortschrittsverhalten untersucht werden sollte. Im Unterschied dazu wurde beim zweiten Modell eine durchlaufende Steife 2a/b angeordnet. Damit sollte das Verhalten für den Fall untersucht werden, daß ein Riß z.B. durch Schrägläufen (bei Schubbeanspruchung) auf eine Steife zwischen den Stößen trifft.

Zu den Enden hin wurden die Modelle mit sehr steifen Krafteinleitungskonstruktionen

verschweißt, die ihrerseits über Bolzen mit der Lastverteilungsplatte bzw. mit dem Widerlager verbunden waren. Ein besonderes Problem ergab sich durch die exzentrische Kraftumlenkung aufgrund des Steifenauslaufs. Es zeigte sich, daß dadurch bei Zugbelastung nennenswerte Biegemomente in das Modell eingeleitet wurden. Zur Abhilfe haben sich zwei Maßnahmen angeboten:

- Eine Verbindung des oberen Flachstahls der Kraftereinleitungskonstruktion mit den Profilmulden, d.h. Einbau eines "Obergurtes", oder
- eine Schwächung des unteren Gurtes (der Platte) durch Ausschnitte, wodurch bei Längsbelastung ein gegendrehendes Biegemoment aufgebaut wird.

Die Entscheidung fiel zugunsten der zweiten Möglichkeit aus, weil eine kerbfreie und damit genügende schwingfeste Verbindung des Flachstahls mit den Profilmulden kaum realisierbar erschien.

Als Ausschnittform zur Schwächung der Platte wurden Ellipsen mit den im Bild 3 angegebenen Abmessungen gewählt. Die Wirksamkeit dieser Ausschnitte wurde durch eine Finite-Element-Analyse mit dem Programm SAPIV /10/ überprüft. Das Bild 4 zeigt die Finite-Element-Idealisierung mit den Verformungen bei einer Zugbelastung, die durch vorgegebene Längsverschiebungen am Modellrand aufgebracht wurde.

Die in Bild 4 erkennbare Steifenabsenkung entsteht durch die erwähnte Kraftumlenkung an den Steifenenden. Die elliptischen Ausschnitte bewirken jedoch, daß die Biegelinie auf halber Modelllänge stark abgeflacht verläuft.

In Bild 5 sind die Längsspannungen in zwei Schnitten dargestellt. Für die halbe Modelllänge (bzw. Mitte Modell) zeigt sich,

- daß die Spannungsdifferenz zwischen der Steifenoberkante und der Platte durch die Ausschnitte von 17 % auf 7 % der Nennspannung  $\sigma_n$  abgebaut wird und
- daß der Spannungsverlauf in der Platte nur unwesentlich durch die Ausschnitte gestört ist.

Zwar ist in dem Schnitt 650 mm vor Mitte Modell der Spannungsverlauf durch die nahen Ausschnitte stärker gestört, für den Reißbereich selbst ergibt sich jedoch ein zufriedenstellender rechnerischer Spannungsverlauf. Es wird weiter unten gezeigt werden, daß der gemessene Spannungsverlauf vom rechnerischen Verlauf abweicht, was im wesentlichen auf die Vorverformung der Modelle zurückgeführt wird.

## 2.3 Werkstoffeigenschaften

Als Werkstoff kam normalfester Schiffbaustahl NF24 zum Einsatz. Die chemische Zusammensetzung und die Ergebnisse von Zugversuchen sind in der Tabelle 1 zusammengefaßt. Zu beachten ist, daß die Platten der beiden Modelle aus unterschiedlichen Chargen stammten.

Zusätzlich sind zu Vergleichszwecken Rißfortschrittsdaten von Interesse, wie man sie aus Versuchen an Kleinproben erhält.

Hierzu wurden aus den beiden verwendeten Platten jeweils zwei Flachproben hergestellt, Bild 6. Durch einen Sägeschnitt wurde in der Probenmitte ein Spalt von insgesamt 8 mm Länge eingebracht. Anschließend wurden die Proben auf dem Resonanzpulsler des Instituts für Schiffbau (Bauart Schenck) einer Schwingbeanspruchung zur Bildung eines Anrisses ausgesetzt. Die Schwingbreite der Nennspannung betrug  $\Delta\sigma = 120\text{N/mm}^2$  und das Grenzspannungsverhältnis war  $R=0$ . Die Prüffrequenz lag bei etwa 30 Hz.

Bei einer Anrißlänge von etwa 2 x 8 mm wurde die Schwingbeanspruchung durch das Signal eines entsprechend angeordneten Dehnungsmeßstreifens (DMS) unterbrochen und der in Bild 6 dargestellte DMS zur Messung des Rißfortschritts angebracht (Typ C PC 03 der Firma Measurement Group Meßtechnik). Dieser besteht aus mehreren parallel geschalteten Widerständen (Abstand jeweils 2 mm), die bei Fortschritt des Risses geöffnet werden und so eine sukzessive Erhöhung des Gesamtwiderstandes zur Folge haben.

Während des Rißfortschrittsversuches bei unveränderter Beanspruchungshöhe wurde das Meßsignal des DMS über einen Rechner periodisch abgefragt und unmittelbar weiterverarbeitet. Durch optische Kontrolle wurde überprüft, ob der Riß in beiden Probenhälften in etwa die gleiche Länge hatte. In einem Fall mußte wegen zu ungleicher Rißlängen ein weiterer Versuch durchgeführt werden.

Durch Auswertung der Signale des DMS haben sich die in Bild 7 dargestellten Rißlängen in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl ergeben. Von den 20 Widerstandsstreifen des DMS lieferten 16 bis 18 Streifen verwertbare Signale. Die restlichen zwei bis vier Streifen wurden in sehr schneller Folge bei hoher plastischer Verformung des Restquerschnittes durchtrennt und wurden von der weiteren Auswertung ausgenommen.

Bei der Ermittlung der Rißfortschrittsgeschwindigkeit  $da/dn$  in Abhängigkeit von der Schwingbreite  $\Delta K$  des Spannungsintensitätsfaktors wurde wie folgt vorgegangen: Die Rißfortschrittsgeschwindigkeit wurde numerisch mit Hilfe des in /11/ beschriebenen

Verfahrens unter Verwendung eines Ausgleichspolynoms über jeweils sieben Punkte bestimmt. Aus der Formel für den Spannungsintensitätsfaktor in einer Platte der Breite  $2b$  mit Mittelriß

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a \cdot \sec \frac{\pi a}{2b}} \quad (1)$$

ergaben sich Werte für  $\Delta K$  zwischen etwa  $900 \text{ N/mm}^{3/2}$  und  $1600 \text{ N/mm}^{3/2}$ . Der Verlauf von  $da/dn$  ist in Bild 8 für die vier Proben dargestellt. Es zeigt sich, daß beide für die Modelle verwendeten Schiffbaustähle in dem Streuband aus /2/ für 14 verschiedene Stähle liegen und somit ein normales Rißfortschrittsverhalten aufweisen.

Nimmt man für des Exponenten der PARIS-Gleichung

$$da/dn = C \cdot (\Delta K)^m \quad (2)$$

den für Stähle typischen Wert von  $m = 3$  an, würde sich aus den Versuchen die Konstante  $C$  zu etwa  $C = 1.7 \cdot 10^{-13}$  ergeben (Einheiten in  $\text{N}$  und  $\text{mm}$ ), vgl. Bild 8.

## 2.4 Versuchsvorbereitung und Meßwerterfassung

Die Fertigung der großen Versuchsmodelle wurde am Institut für Schiffbau vorgenommen. Die Bauteile wurden durch Elektrohandschweißung verbunden. Bei der Verschweißung der Profilstöße wurde in werftüblicher Weise vorgegangen, indem zuerst die Kehlnähte zwischen Profil und Platte mit Ausnahme der freien Dehnlänge von etwa  $150 \text{ mm}$  vor und hinter dem Stoß geschweißt wurden. Anschließend wurden die Profilenenden durch eine Steigenaht verbunden. Zuletzt wurde die Verschweißung zwischen Profil und Platte im Bereich der freien Dehnlänge ausgeführt.

Mit der Verschweißung der Bauteile und dem Einbau in die große Festigkeitsversuchsanlage wurden Vorverformungen in das Modell eingebracht. Die Bilder 9 und 10 zeigen die aufgemessenen Vorverformungen der drei mittleren Steifen in Vertikalrichtung. Da auch in der Schiffskonstruktion mit entsprechend großen Vorverformungen zu rechnen ist, wurden keine weiteren Veränderungen oder Richtarbeiten vorgenommen. Auf die Auswirkung der Vorverformungen auf die Spannungen wird in den nachfolgenden Abschnitten eingegangen.

Zur Erfassung der Spannungen und Verformungen während des Versuchs dienten Dehnungsmeßstreifen (DMS) und Weggeber (Meßuhren). Die Lage der Meßstellen ist aus

Bild 11 ersichtlich.

Die DMS der Firma Hottinger Baldwin Meßtechnik wurden an drei Querschnitten A-A, B-B und C-C angebracht. An den Querschnitten A-A und B-B sollte der Spannungsverlauf in größerer Entfernung sowie unmittelbar vor der Reißebene ermittelt werden. Der Querschnitt C-C diente zu Kontrollzwecken.

Mit den Weggebern sollte die Längsverschiebung (1-4) des Modells sowie die Vertikalverschiebung der Steifen auf halber Länge (5-7) relativ zu den Steifenenden (8-11) überprüft werden, vgl. Bild 11.

Während die Verformungen manuell aufgenommen wurden, konnten die Dehnungen über die Rechenanlage des Hauses erfaßt und weiterverarbeitet werden.

Zur Reißbeobachtung wurde die Plattenoberseite und die glatte Profilseite in dem Bereich, in dem der Reißverlauf erwartet wurde, geschliffen. Für die Messung der Reißlängen wurden beiderseits des erwarteten Reißverlaufes Meßbänder aus Metall fest mit dem Modell verbunden. Zu verschiedenen Zeitpunkten wurde die Reißspitze mit Hilfe einer Lupe visuell lokalisiert. Die Reißlänge ließ sich über ein querliegendes Lineal an den Meßbändern ablesen. Die Genauigkeit dieser Reißlängenmessung wird auf  $\pm 0.5$  mm geschätzt.

Zur Anzeige weiterer Anrisse sowie zur Untersuchung des Reißschließverhaltens wurden zusätzliche Dehnungsmeßstreifen angeordnet, auf die bei der Beschreibung der Ergebnisse eingegangen wird.

## 2.5 Versuchsdurchführung

Nach Abschluß aller Vorbereitungen und einigen Probelastungen wurde ein Reißstarter durch Sägeschnitt in das Modell eingebracht, Bild 12. Anschließend wurde das Modell dynamisch belastet.

Die servohydraulischen Zylinder wurden kraft geregelt gefahren. Als Unterlast wurde eine Druckkraft von 10 kN vorgegeben. Die Oberlast wurde über längere Versuchsabschnitte konstant gehalten und entsprechend dem Reißfortschritt in Stufen reduziert. Das Grenzspannungsverhältnis betrug dabei ungefähr  $R = 0$ .

Die Zylinder ließen sich mit unterschiedlichem Druck beaufschlagen. Dadurch konnte ein Ausgleich des Spannungsverlaufes über die Modellbreite erfolgen. Zur Einregelung

bei den einzelnen Laststufen wurden die Dehnungen der äußeren Meßstreifen betrachtet, Bild 11.

Die Lastfrequenz betrug beim ersten Modell anfangs 0.4 Hz. Später wurde sie wie auch beim zweiten Modell zur Erzielung einer höheren Regelgenauigkeit auf 0.25 - 0.3 Hz reduziert.

Aus Gründen der Überwachung wurden die Versuche vorwiegend am Tage während der normalen Arbeitszeit durchgeführt. Insgesamt waren bis zum Erreichen der vorgesehenen Rißlänge beim ersten Modell 350.000 Lastwechsel und beim zweiten Modell 370.000 Lastwechsel erforderlich. Die gesamte Versuchsdauer betrug bei jedem Modell mehrere Monate.

In regelmäßigen Abständen, zumeist alle 5.000 Lastwechsel, wurde die Rißlänge in der beschriebenen Weise von möglichst ein und derselben Person abgelesen. Alle 10.000 oder 15.000 Lastwechsel wurde die dynamische Belastung unterbrochen und die Dehnungen und Verformungen bei statisch aufgebrachten Lasten gemessen.

Die aus der Belastung ermittelte Schwingbreite  $\Delta\sigma$  der Nennspannung im Modell ist in Bild 13 in Abhängigkeit von der Versuchsdauer (Lastwechselzahl  $n$ ) dargestellt.

Beim Modell 1 mußte statt der geplanten Anfangsschwingbreite  $\Delta\sigma$  von  $150 \text{ N/mm}^2$  ein niedrigerer Wert von  $136 \text{ N/mm}^2$  eingestellt werden. In der Anrißphase vor dem eigentlichen Versuchsbeginn, der mit dem Erreichen einer Anrißlänge von etwa  $2 \times 18 \text{ mm}$  an der Plattenoberseite festgelegt wurde, hatte sich herausgestellt, daß die Schrauben zwischen Modell und Widerlager aufgrund der Innenstruktur des Widerlagers ungleich trugen und deshalb wiederholt Schraubenbrüche auftraten. Die Schrauben wurden daraufhin fortlaufend gegen höherbelastbare Dehnschrauben ausgetauscht. Darüber hinaus zeigten sich anfangs mehrere Risse an den Modellenden, die ausgebessert werden mußten. Schließlich wurde nach 115.000 Lastwechseln die erwähnte Änderung der Lastfrequenz vorgenommen, wodurch sich eine genauer eingeregeltere Schwingbreite  $\Delta\sigma$  von  $139 \text{ N/mm}^2$  einstellte.

Mit zunehmender Rißlänge und Rißfortschrittsgeschwindigkeit wurden die erwähnten Lastreduzierungen erforderlich, um den Gültigkeitsbereich der linear-elastischen Bruchmechanik nicht zu weit zu verlassen. Zudem mußte im letzten Versuchsabschnitt das Risiko eines instabilen Restbruches vermieden werden.

Als maximale Rißfortschrittsgeschwindigkeit wurde ein Wert von etwa  $5 \cdot 10^{-3} \text{ mm/LW}$

(mm/Lastwechsel) für sinnvoll erachtet. Das bedeutete, daß bei einer Rißlängenänderung von etwa 25 mm innerhalb von 5.000 Lastwechseln eine Lastreduzierung notwendig wurde.

Die erste Reduzierung von  $139 \text{ N/mm}^2$  auf  $105 \text{ N/mm}^2$  führte allerdings zu einem fast völligen Stillstand des Risses, so daß anschließend die Schwingbreite wieder auf  $118 \text{ N/mm}^2$  angehoben wurde (Bild 13 oben). Wie noch gezeigt wird, machten erhebliche plastische Verformungen und die damit verbundenen Rißschließe effekte eine rechnerische Abschätzung der jeweils notwendigen Lastdifferenzen unmöglich. Die nachfolgenden Lastreduktionen wurden daher recht vorsichtig vorgenommen.

Beim Modell 2 lag der Rißstarter am Profilkopf der mittleren Steife, Bild 12 rechts. Als Anfangsschwingbreite der Nennspannung wurden  $133 \text{ N/mm}^2$  gewählt, wobei sich rasch ein Anriß bildete und ein schneller Rißfortschritt auftrat. Die Lastreduktionen im weiteren Versuchsablauf konnten aufbauend auf den Erfahrungen und Auswertungen aus dem Modell 1 vorgenommen werden.

## 2.6 Ermittelter Rißverlauf

Der nach Versuchsende aufgemessene Rißpfad ist in den Bildern 14 und 15 für die beiden Modelle dargestellt. Die Aufmaße  $x$  bezüglich Mitte Modell (halbe Modelllänge) wurden an der Plattenoberseite bzw. an der glatten Profilseite aufgenommen. Zusätzlich ist die Neigung  $\varphi$  der Rißflanken angegeben.

Die Bilder zeigen, daß der Riß in der Platte im großen und ganzen ungefähr senkrecht zur Belastungsrichtung verlief.

Bei dem ersten Modell mit dem Profilstoß in der Steife 2 lief der Riß an der Modellseite a wie erwartet durch das Abschweißloch. An der Modellseite b erreichte der Riß dagegen die Steife 2b etwa 15 mm neben dem Abschweißloch. Da bereits vorher ein Anriß an der Oberkante des Abschweißloches entstanden war, erweiterte sich daraufhin der Riß von der Platte als Schubriß in Richtung zum Abschweißloch (Bild 14 oben). Dadurch verzögerte sich das Rißwachstum in der Platte und es entstanden ungleiche Rißlängen an den beiden Modellseiten. Wegen der zu ungleichen Rißlängen und Rißgeschwindigkeiten wurde der Versuch schließlich kurz vor dem Durchtrennen der Steife 2b beendet.

Bei dem zweiten Modell mit durchlaufender Steife 2 verlief das Rißwachstum an den beiden Modellseiten bis zuletzt sehr ausgeglichen.

Die Rißflanken waren bei beiden Modellen überwiegend um etwa  $60^\circ$  gegenüber der Platten- bzw. Profilebene geneigt.

Die während des Versuchsablaufes gemessenen Rißlängen sind in den Tabellen 2 und 3 aufgelistet. Wie aus der Rißlängendefinition in Bild 16 hervorgeht, ist die Rißlänge  $a$  in der Platte jeweils an der Oberseite aufgenommen worden. Eine Ausnahme bildet beim Modell 2 der Bereich 20 mm vor und hinter der Steife 2, wo an der Plattenunterseite gemessen wurde. Parallelmessungen zeigten, daß beim Übergang von der Ober- zur Unterseite die Rißfront nahezu gerade war.

Bei den Steifen ist die Rißlänge  $a_1$  (Steife 1) bzw.  $a_2$  (Steife 2) an der glatten Profilseite gemessen worden. Die Rißlängen beziehen sich auf die Steifenunterkante bzw. auf den Scheitelpunkt des Abschweißloches, soweit vorhanden.

Das Bild 17 mit der grafischen Darstellung der gemessenen Rißlängen veranschaulicht die einzelnen Phasen des Versuchsablaufes beim Modell 1:

- Ausgehend vom Rißstarter in der Platte (Bild 12 links) war der Rißfortschritt anfangs recht gering. Vor allem verhinderte die intakte Steife 1 eine schnelle Rißausbreitung. In dieser Steife wurde nach 55.000 Lastwechseln ein Anriß am Abschweißloch entdeckt, der bei 62.000 LW den 10 mm über dem Scheitelpunkt angebrachten DMS erreichte (vgl. Bild 12 links). Mit zunehmender Rißausbreitung in der Steife 1 wuchs auch die Rißfortschrittsgeschwindigkeit in der Platte an. Nach 130.000 Lastwechseln war schließlich die Steife 1 praktisch durchtrennt.
- Die nach 150.000 LW vorgenommene Lastreduktion führte zu dem bereits erwähnten starken Abfall des Rißwachstums, so daß nach 170.000 LW die Last wieder angehoben wurde.
- Zwischen 240.000 LW und 245.000 LW erreichte die Rißfortschrittsgeschwindigkeit extrem hohe Werte, woraufhin die Last ein weiteres Mal reduziert wurde.
- Lange bevor der Riß in der Platte die Steifen 2a und 2b erreicht hatte, wurden dort mittels entsprechend angeordneter DMS Anrisse am Abschweißloch festgestellt. Diese hatten sich bis zu dem Zeitpunkt, an dem der Plattenriß die jeweilige Steife erreichte, auf eine Länge von etwa 25 mm vergrößert.
- Der weitere Versuchsablauf war von dem erwähnten ungleichen Rißwachstum an den beiden Modellseiten geprägt. An der Seite a lief der Riß durch das Abschweißloch und erreichte nach der Lastreduktion bei 290.000 LW schnell wieder eine Rißfortschrittsgeschwindigkeit von über  $5 \cdot 10^{-3}$  mm/LW, so daß eine erneute Lastreduktion erforderlich wurde. An der Seite b traf der Riß dagegen nicht

auf das Abschweißloch und blieb wegen der erwähnten Schubrißbildung zurück. Bei Versuchsende war neben der Steife 1 schließlich nur die Steife 2a vollständig durchtrennt.

Der Versuchsablauf beim Modell 2 wird durch die Darstellung der gemessenen Rißlängen in Bild 18 veranschaulicht:

- In der Steife 1 mit dem Rißstarter am Steifenwulst (Bild 12 rechts) wurde recht schnell ein Anriß und eine hohe Rißfortschrittsgeschwindigkeit beobachtet. Die Steife war bereits nach 11.820 LW durchtrennt.
- Nach 16.100 LW war am Kehlnahtauslauf zur Platte am Rande des Abschweißloches ein Anriß nachweisbar. Das Durchschlagen des Risses durch die Plattenunterseite nach 38.200 LW wurde mit Hilfe dort angeordneter DMS angezeigt, Bild 12 rechts.
- In der nachfolgenden Phase der Rißausbreitung zwischen den Steifen wurde die Last zweimal reduziert.
- Mit der Annäherung des Risses an die Steife 2 wurde eine leichte Rißverzögerung beobachtet. Dafür war im Plattenfeld hinter der Steife 2 die Rißfortschrittsgeschwindigkeit um so höher.
- Kurz vor dem vollständigen Durchtrennen der Steife 2 wurde die Last noch einmal reduziert, um das Risiko eines instabilen Restbruches zu verringern.

## 2.7 Weitere Versuchsergebnisse

Die während des Versuchsablaufes ermittelten Spannungen sind in den Bildern 19 und 20 für jeweils zwei Meßquerschnitte dargestellt.

Im Meßquerschnitt A-A ist schon zu Versuchsbeginn (0 Lastwechsel) ein Spannungsabfall zur Mitte hin vorhanden. Dieser wird im wesentlichen von den nahen elliptischen Ausschnitten hervorgerufen, wie auch die Berechnungsergebnisse im Bild 5 gezeigt haben. Der zusätzliche Spannungsabfall im weiteren Versuchsablauf ist mit dem sich ausbreitenden Riß auf halber Modelllänge zu erklären.

Im Meßquerschnitt B-B (100 mm vor Mitte Modell) ist der Spannungsverlauf zu Versuchsbeginn im Unterschied zur Berechnung (Bild 5) sehr unregelmäßig. Besonders die Stege der Steifen weisen einen hohen Spannungsgradienten auf. Als wesentliche Ursache dafür werden die vorhandenen Vorverformungen angesehen, die in den Bildern 9 und 10 für die Steifen dargestellt sind. Die Höhe der dadurch möglichen Zusatzspannungen kann durch eine einfache Balkenrechnung nachgewiesen werden. So entsteht in der Oberkante einer eingespannten Steife mit einer dreiecksförmigen Vorverformung von max. 8 mm (Steife 1 des Modells 1) eine zusätzliche Biegespannung in Höhe von etwa 30% der Längsspannung, wobei der Einfluß der Theorie II. Ordnung recht gering bleibt.

Zusätzlich wirken sich im Meßquerschnitt B-B die Abschweißlöcher und im weiteren Versuchsablauf der sich ausbreitende Riß auf den Spannungsverlauf aus.

Die während des Versuches gemessenen Verformungen der Steifen unter Last sind in den Bildern 21 und 22 für die beiden Modelle gezeigt.

Die Lastverformungen zu Versuchsbeginn sind im wesentlichen von den erwähnten Vorverformungen verursacht. Im weiteren Versuchsablauf ist das Verformungsverhalten stark von der Rißlänge in der jeweiligen Steife abhängig. Darüber hinaus führen die oben beschriebenen Anfangsprobleme (Schraubenbrüche etc.) sowie die Reibung und der Verschleiß in den Lagern zu einer Streuung der Meßergebnisse.

Es ist jedoch gut zu erkennen, daß ein Riß im unteren Stegbereich einer Steife eine Absenkung um 1-2 mm hervorgerufen hat. Nach dem vollständigen Durchtrennen haben sich die jeweiligen Steifen unter Last um 2-4 mm nach oben verformt.

Desweiteren wurden Untersuchungen zum Rißschließenverhalten durchgeführt. Der fast völlige Stillstand des Risses beim Modell 1 nach der ersten Lastreduktion sowie Beobachtungen während des Versuchsablaufes zeigten, daß erhebliche plastische Verformungen und damit verbundenes Rißschließen bei noch vorhandener Zugbelastung aufgetreten sind.

Um einen Eindruck von dem Anteil  $U$  am Lastzyklus zu erhalten, bei dem der Riß an der Rißspitze geöffnet ist, wurde bei verschiedenen Rißlängen entsprechend der u.a. in /12/ beschriebenen Methode jeweils ein 3 mm-DMS dicht neben der Rißspitze auf der Platte befestigt, Bild 23 oben. Die Dehnungsänderung bei ansteigender Last gibt Aufschluß darüber, ob der Riß geschlossen (starke Dehnungsänderung) oder geöffnet ist (geringe Dehnungsänderung).

Das Bild 23 zeigt den ermittelten Last-Dehnungsverlauf für eine Messung am Modell 2 (Seiten a und b), und zwar jeweils für einen DMS an der Plattenober- und -unterseite. Bei der Mehrzahl der Messungen weist der Knick im Dehnungsverlauf eindeutig auf den Punkt des Reißöffnens bzw. -schließens. Manche Dehnungsverläufe wie z.B. der linke Verlauf im Bild 23 oben sind jedoch nicht so eindeutig interpretierbar und liefern nur einen Anhaltswert. Als ursächlich für diese schwer interpretierbaren Dehnungsverläufe wird in erster Linie der komplexe dreidimensionale Vorgang des Reißöffnens bzw. -schließens in einem versteiften Plattenfeld angesehen, wo sich insbesondere der Kontakt von durchtrennten Steifenenden auf das Reißschließenverhalten der Platte auswirkt.

Insgesamt wurden sieben Dehnungsmessungen an den Reißspitzen in der Platte durchgeführt. Die sich daraus ergebenden Reißöffnungsanteile  $U$  am Lastzyklus sind in der Tabelle 4 zusammengefaßt. Beim Modell 1 wurde nur an der Plattenoberseite gemessen, beim Modell 2 dagegen sowohl an der Plattenober- als auch -unterseite.

Die Zahlenwerte in der Tabelle 4 geben ein etwas uneinheitliches Bild. Insbesondere die unterschiedlichen Reißöffnungsanteile an der Plattenober- und -unterseite erschweren eine Verallgemeinerung der Ergebnisse. Man kann jedoch erkennen, daß überwiegend niedrige Werte von etwa  $U = 0.6$  oder, nach einer Lastreduktion, sogar  $U = 0.5$  aufgetreten sind. Diese Werte liegen deutlich niedriger als entsprechende Werte für Stahl aus der Literatur, z.B.  $U = 0.7$  bis  $0.8$  nach /12/ für  $R=0$ .

## 2.8 Ermittlung der Reißfortschrittsgeschwindigkeit

Bei der Ermittlung der Reißfortschrittsgeschwindigkeit  $da/dn$  in der Platte und in den Steifen der beiden Versuchsmodelle wurde wie folgt vorgegangen:

Der im Versuch ermittelte Verlauf der Reißlängen in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl  $n$ , Bilder 17 und 18, wurde durch Ausgleichskurven approximiert. Die Bilder 24 und 25 geben einen Eindruck von dem gewählten Kurvenverlauf.

Anschließend wurden die Kurven numerisch differenziert. Nach einer Glättung haben sich die in den Bildern 26 bis 31 dargestellten Reißfortschrittsgeschwindigkeiten  $da/dn$  ergeben. In diesen Bildern sind folgende Punkte bemerkenswert:

- Nach jeder Lastreduktion tritt eine starke Verzögerung des Reißfortschritts auf. Erst allmählich stabilisiert sich die Reißfortschrittsgeschwindigkeit  $da/dn$  wieder. Der Effekt der Reißverzögerung ist eng mit der Ausbildung der plastischen Zone

vor der Rißspitze verbunden. Um einen Eindruck von der Ausdehnung der plastischen Zone zu erhalten, ist in den Bildern 26, 27, 29 und 30 die plastische Länge  $a_{pl}$  nach IRWIN für eine unversteifte Platte mit Mittelriß eingezeichnet (ebener Spannungszustand):

$$a_{pl} = a \cdot \left( \frac{\sigma_n}{\sigma_F} \right)^2 \quad (3)$$

wobei  $\sigma_n$  die maximale Nennspannung ( $\approx \Delta\sigma$ ) und  $\sigma_F$  die Fließspannung (= ReH) ist. Die Bilder zeigen, daß sich die Rißfortschrittsgeschwindigkeit ungefähr beim Verlassen der plastischen Zone wieder stabilisiert.

- Die Bilder 26 und 27 zum Modell 1 verdeutlichen den extrem starken Anstieg der Rißfortschrittsgeschwindigkeit  $da/dn$  bei der Rißlänge von etwa 300 mm in der Platte. Im weiteren Versuchsablauf ist wiederholt ein unmittelbares Überwechseln der Rißfortschrittsgeschwindigkeit von der Verzögerungsphase in diese Phase sehr hoher Fortschrittsgeschwindigkeiten zu beobachten.
- Die Bilder 29 und 30 zum Modell 2 zeigen den stärkeren Einfluß der Steife 2 ( $a = 420$  mm) auf den Rißfortschritt. Vor Erreichen der Steife ist ein Absinken und danach ein starkes Anwachsen der Rißfortschrittsgeschwindigkeit auf ein stabilisiertes Niveau zu verzeichnen.

Aus den Rißfortschrittsgeschwindigkeiten in den Bildern 26 bis 31 sind insgesamt 35 Punkte für die weitere Auswertung im Zusammenhang mit der im folgenden Kapitel beschriebenen Berechnung ausgewählt und mit Symbolen markiert worden. Die Auswahl erfolgte willkürlich. Ausgenommen wurden lediglich die Rißverzögerungsphasen nach den Lastreduktionen sowie beim Modell 1 das besondere Rißfortschrittsverhalten im Bereich der Steife 2b.

### 3 Ermittlung der Spannungsintensitätsfaktoren

In diesem Kapitel werden die Vorgehensweise und die Ergebnisse einer Berechnung der Spannungsintensitätsfaktoren für die beiden Versuchsmodelle beschrieben. Einschränkend wird beim Versuchsmodell 1 nur die Seite a betrachtet, an welcher der Riß in der erwarteten Weise durch das Abschweißloch der Steife 2 gelaufen ist.

Wegen der komplexen Geometrie der Modelle wurde die Methode der finiten Elemente angewendet. Dabei wurden mehrere Vereinfachungen eingeführt:

- Idealisierung durch zweidimensionale Scheibenelemente

- linear-elastische Berechnung und
- Annahme eines geradlinigen Riverlaufes mit reiner Modus I-Beanspruchung.

Abgesehen davon, daß der Berechnungsaufwand in Grenzen gehalten werden mußte, sollte mit dieser Vorgehensweise gezeigt werden, inwieweit Vorhersagen zum Rißfortschritt auch bei derartigen Vereinfachungen möglich sind. Aufgrund der guten Ergebnisse wurde auf eine detailliertere Berechnung verzichtet.

### 3.1 Finite-Element-Idealisierung

Das versteifte Plattenfeld wurde aus isoparametrischen Scheibenelementen mit Zwischenknoten an den Kanten idealisiert (ebener Spannungszustand). Dieser Elementtyp ist für Riuntersuchungen besonders geeignet, weil durch das Verschieben der Zwischenknoten auf den 1/4-Punkt in unmittelbarer Rispitzenumgebung die dort vorhandene Spannungssingularität exakt nachgebildet werden kann [13, 14]. Voruntersuchungen, u.a. in [15, 16], haben gezeigt, daß schon eine recht grobe Elementteilung zu sehr genauen Ergebnissen führt.

Die gewählte Elementteilung ohne Riß ist in Bild 32 dargestellt. Von den beiden Symmetrieebenen wurde nur diejenige in Modelllngsrichtung ausgenutzt, um den außermittigen Rißverlauf ausgehend vom Rand des Abschweifloches nachbilden zu können.

Zusätzlich zu den Scheibenelementen sind isoparametrische Stabelemente zur Idealisierung der Steifenwulste sowie der außen liegenden Steife verwendet worden.

An den Modellenden wurde die Längsverschiebung festgehalten bzw. zur Lasteinleitung konstant vorgegeben.

Die Länge des Modells betrug 3000 mm. Zusätzliche Berechnungen zeigten, daß eine größere Länge praktisch keinen Einfluß auf die Verformungen und Spannungen im Rispitzenbereich hat. Allerdings veränderte sich noch die Vertikalverschiebung der angerissenen oder durchtrennten Steifen. Bei der gewählten Modelllänge lagen die Verschiebungen in der bei den Versuchen beobachteten Größenordnung.

Der Bereich, in dem sich der Riß in der Platte bzw. in den Steifen ausgebildet hat, wurde relativ gleichmäßig in Rechteckelemente eingeteilt. An der jeweils aktuellen Rißspitze wurde eine Netzverfeinerung vorgenommen. Hierfür sowie für die Bildung des neuen Riufers wurde eine ausreichende Anzahl von Knoten in Reserve gehalten, um

die Bandbreite des Gleichungssystems nicht zu erhöhen.

Die gewählte Technik der Netzverfeinerung und der Rißuferbildung ist in Bild 33 veranschaulicht. Zuerst wurden entlang des Rißverlaufes neue Rißuferknoten eingefügt und eine Trennung durch entsprechende Elementzuordnung vorgenommen. Anschließend wurde das Netz im Bereich von vier Scheibenelementen an der Rißspitze verfeinert. Mit Hilfe eines speziellen Generierprogramms wurden zusätzliche Knoten angeordnet, die vorhandenen Knoten z.T. verschoben sowie die vier Scheibenelemente gegen 24 neue Elemente ausgetauscht. Nach den Empfehlungen in /17/ wurden an der Rißspitze ausschließlich Dreieckselemente (degenerierte Viereckselemente) verwendet, um die gewünschte Spannungssingularität auch innerhalb der Elemente zu erhalten.

Das Bild 34 zeigt beispielhaft die ermittelten Netzverformungen am Modell 1 für einen Berechnungsfall, bei dem die Steife 1 vollständig durchtrennt ist und die Rißspitze sich in der Platte bereits hinter der angerissenen Steife 2 befindet. Deutlich erkennbar ist die vorgenommene Netzveränderung an den Rißspitzen in der Platte und in der Steife 2.

Insgesamt wurden für das erste Modell 45 Fälle und für das zweite Modell 30 Fälle mit unterschiedlichen Rißlängen in der Platte und in den Steifen berechnet.

Zur Durchführung der Berechnungen wurde das Programm ADINA /18/ verwendet. Die Rechenzeit auf der VAX 11/780 des Instituts für Schiffbau betrug für jeden Fall etwa 7 CPU-Minuten, wobei jeweils ein System von etwa 2.400 Gleichungen zu lösen war.

### **3.2 Zur Berechnung der Spannungsintensitätsfaktoren**

Für eine Berechnung der Spannungsintensitätsfaktoren aus FE-Analysen mit allgemeinen Programmen ohne Eingriffsmöglichkeiten bieten sich die sogenannte Verformungsmethode und die Spannungsmethode an.

Dabei wird der Verformungs- bzw. Spannungszustand im unmittelbaren Rißspitzenumfeld mit der theoretischen Lösung (SNEDDON-Gleichungen) verglichen und daraus auf die Höhe des Spannungsintensitätsfaktors geschlossen.

Mit beiden Methoden haben sich fast identische Resultate ergeben /16/, so daß hier nur die mit der Verformungsmethode erzielten Ergebnisse vorgestellt werden. Für die angenommene reine Modus I-Beanspruchung ergibt sich der Spannungsintensitätsfaktor

aus:

$$K_I = \frac{E \cdot \sqrt{2\pi/r} \cdot \Delta u}{4} \quad (4)$$

mit

- $E$  = Elastizitätsmodul
- $\Delta u$  = Relativverschiebung (bzgl. Rißspitze) eines Punktes am Rißufer in Richtung quer zum Riß
- $r$  = Abstand des Punktes von der Rißspitze.

Dabei ist der ebene Spannungszustand vorausgesetzt worden.

Mit Hilfe eines speziellen Nachlaufprogramms wurden die  $K_I$ -Werte jeweils an den beiden zur Rißspitze nächstliegenden Rißuferknoten berechnet und linear zur Rißspitze hin extrapoliert. Für das linke und rechte Rißufer ergaben sich in der Regel etwas unterschiedliche Werte (wegen der Annahme reiner Modus I-Beanspruchung), aus denen der Mittelwert gebildet wurde.

Da im Finite-Element-Modell jeweils eine konstante Längsverschiebung vorgegeben wurde, änderte sich mit zunehmender Rißlänge die Nachgiebigkeit des Modells und damit auch die Nennspannung  $\sigma_n$ . Die Spannungsintensitätsfaktoren wurden zur besseren Vergleichbarkeit auf eine einheitliche Nennspannung  $\sigma_n = 100N/mm^2$  umgerechnet. Eine Rückrechnung auf die Verhältnisse bei konstanter Randverschiebung kann mit Hilfe des Bildes 35 vorgenommen werden.

### 3.3 Ergebnisse der Berechnung

Die sich ergebenden Spannungsintensitätsfaktoren  $K_I$  für den Riß in der Platte bzw. in den Steifen sind in den Bildern 36 und 37 für das Modell 1 und in den Bildern 38 und 39 für das Modell 2 dargestellt. Die Rißlängen  $a, a_1$ , und  $a_2$  sind wie im Versuch definiert worden.

Für die einzelnen Rißlängen in einer Steife sind mehrere Rißlängen in der Platte betrachtet worden, so daß sich in Steifennähe ein Bereich für  $K_I$  aus den verschiedenen Rißlängenkombinationen ergeben hat. In den Bildern sind zusätzlich die bei den Versuchen beobachteten Rißlängenkombinationen eingetragen. Aus den Ergebnissen für die Platte (Bilder 36 und 38) wird deutlich, daß eine Rißverzögerung durch die Steife 2

nur beim Modell 2 ohne Abschweißloch zu erwarten ist. Anschließend tritt ein um so steilerer Anstieg des Spannungsintensitätsfaktors auf. Dieses deckt sich mit den Beobachtungen zum Rißfortschritt bei den Versuchen.

Dagegen steigt beim Modell 1 der Spannungsintensitätsfaktor  $K_I$  in der Platte mit wachsender Rißlänge stetig an, vorausgesetzt, daß vor Erreichen der Steife 2 bereits dort ein Anriß vorliegt. Davon kann man jedoch i.a. ausgehen, denn die Spannung am Scheitelpunkt des Abschweißloches in der Steife 2 nimmt bei Annäherung des Risses in der Platte erheblich zu, wie Bild 40 verdeutlicht. Bemerkenswert ist, daß der ermittelte  $K_I$ -Verlauf sehr dem Verlauf für eine unversteifte Platte, Gleichung (1), ähnelt, der ebenfalls in die Bilder 36 und 38 eingezeichnet wurde. Mit einem Vorfaktor könnte eine auf der sicheren Seite liegende Näherungsgleichung aufgestellt werden, z.B.:

$$da/dn = (1.1...1.2) \cdot \Delta\sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot \sqrt{\sec\left(\frac{\pi \cdot a}{2 \cdot b}\right)} \quad (5)$$

Dabei ist zu beachten, daß dieser Vorfaktor hauptsächlich von der vorhandenen Steifenquerschnittsfläche in Relation zur Plattenquerschnittsfläche zwischen den Steifen abhängt. Darauf weist auch die Untersuchung in /5/ hin, bei der mit relativ zur Platte stärkeren Steifen sich größere Unterschiede zu den Ergebnissen für eine unversteifte Platte ergeben haben.

## 4 Diskussion der Ergebnisse

Mit den berechneten Spannungsintensitätsfaktoren und den Rißfortschrittsgeschwindigkeiten aus den Versuchen lassen sich Vergleiche mit anderen Untersuchungsergebnissen ziehen sowie Betrachtungen über Vorhersagen zum Rißfortschritt bei versteiften Plattenfeldern anstellen.

Hierzu wurden die Spannungsintensitätsfaktoren  $K_I$  für die im Kapitel 2.8 ausgewählten 35 Rißfortschrittsgeschwindigkeiten  $da/dn$  aus den Bildern 36 bis 39 abgelesen, wobei die jeweils aktuelle Schwingbreite  $\Delta\sigma$  der Nennspannung angesetzt wurde.

Das Ergebnis ist im Bild 41 dargestellt. Zusätzlich eingetragen sind die Ergebnisse aus den Rißfortschrittmessungen an den Kleinproben.

Hervorzuheben in Bild 41 sind die folgenden Punkte:

- Die meisten Rißfortschrittsgeschwindigkeiten für die versteiften Plattenfelder liegen innerhalb des Streubandes aus /2/ für 14 verschiedene Stähle. Lediglich zwei

Punkte "A" für das Modell 2 liegen etwas weiter vom Streuband entfernt. Es handelt sich dabei um Punkte, die offenbar noch in der Rißverzögerungsphase nach einer Lastreduktion gelegen haben (Punkte "A" in Bild 29 und 30).

- Recht hohe Rißfortschrittsgeschwindigkeiten traten im unteren Teil der Steife 2a/b im Modell 2 auf (Punkte "B" im Bild 31 und 41). Es wird vermutet, daß hier die erhöhten Spannungen aus der Vorverformung eine Rolle gespielt haben.
- Die überwiegende Anzahl der ausgewählten Ergebnisse für die versteiften Plattenfelder liegen deutlich näher am unteren Rand des Streubandes als die Ergebnisse aus den Kleinproben. Das deutet darauf hin, daß weitere Einflüsse eine Rolle gespielt haben müssen.

Ein Hinweis auf diese weiteren Einflüsse ergibt sich aus dem beobachteten Rißschließenverhalten der Versuchsmodelle. Die im Kapitel 2.7 beschriebenen Rißöffnungsanteile am jeweiligen Lastzyklus lagen deutlich niedriger als die in der Literatur angegebenen Werte.

Zur Berücksichtigung von Rißschließeneffekten bei der Vorausbestimmung der Rißfortschrittsgeschwindigkeit wurde von ELBER in /19/ die folgende Erweiterung der PARIS-Gleichung (2) vorgeschlagen:

$$da/dn = C \cdot [U(R) \cdot \Delta K]^m \quad (6)$$

Der vom Werkstoff sowie vom Grenzspannungsverhältnis  $R$  abhängende Faktor  $U$  bestimmt den effektiven Anteil  $\Delta K_{eff}$  der Schwingbreite des Spannungsintensitätsfaktors:

$$\Delta K_{eff} = U(R) \cdot \Delta K \quad (7)$$

In verschiedenen Arbeiten, u.a. in /12/, wurde gezeigt, daß  $U$  in etwa dem Rißöffnungsanteil am gesamten Lastzyklus entspricht. Dieser Anteil scheint aber nach den hier erzielten Versuchsergebnissen außer von  $R$  auch noch von  $da/dn$  bzw.  $\Delta K$  abzuhängen.

In der Literatur, z.B. in /20/ und /21/, finden sich wiederholt Hinweise auf geringere Rißfortschrittsgeschwindigkeiten  $da/dn$ , als sie sich nach der PARIS-Gleichung ergeben würden. Dieses Abweichen von der Geraden im doppeltlogarithmischen Netz wird mit dem Überwechseln vom ebenen Dehnungs- zum ebenen Spannungszustand begründet.

Die an den Versuchsmodellen nachgewiesenen schrägen Rißflanken (Bilder 14 und 15) deuten auf den ebenen Spannungszustand bei der Rißausbreitung hin. Es ist bekannt,

daß beim ebenen Spannungszustand wesentlich größere plastische Zonen als beim ebenen Dehnungszustand auftreten. Mit den größeren plastischen Zonen läßt sich der beobachtete hohe Anteil des Reißschließens am Lastzyklus und die dadurch entsprechend verringerte Reißfortschrittsgeschwindigkeit erklären.

Demzufolge müßte bei dem Faktor  $U$  in der Gleichung (6) bzw. (7) zwischen der Reißausbreitung im ebenen Spannungs- und Dehnungszustand differenziert werden und unterschiedliche Werte für einen Werkstoff angegeben werden.

Unter Einbeziehung des veränderten Reißfortschrittsverhaltens beim ebenen Spannungszustand werden die Möglichkeiten zur Vorausbestimmung des Reißfortschritts in versteiften Plattenfeldern auf der Basis der PARIS-Gleichung durch die Untersuchungen bestätigt. Bemerkenswert ist, daß sich dabei weder das stark vereinfachte Berechnungsmodell noch die in den Versuchsmodellen vorhandenen Vorverformungen und Eigenspannungen besonders auswirken. Anstelle einer aufwendigen Finite-Element-Berechnung bieten sich sogar vereinfachte Formeln an, z.B. die vorgeschlagene Gleichung (5).

Es sei abschließend darauf hingewiesen, daß bei nichtkonstanter Belastungsamplitude zusätzliche Probleme im Zusammenhang mit Reißverzögerungs- oder -beschleunigungseffekten zu erwarten sind. Diese Probleme werden jedoch als nicht spezifisch für versteifte Plattenfelder angesehen und sind daher im Rahmen dieser Arbeit auch nicht weiter untersucht worden.

## **5 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen**

In der vorliegenden Arbeit wurden Untersuchungen zum stabilen Reißfortschrittsverhalten von versteiften Plattenfeldern aus Schiffbaustahl bei dynamischer Längsbelastung beschrieben.

Die experimentellen Untersuchungen wurden an zwei Modellen aus 8 bzw. 7 mm dicken Platten durchgeführt, die mit Profilen HP 120 x 7 im Abstand von 420 mm versteift waren. Der Anriß ging von unterschiedlichen Reißstartern am Stoß der mittleren Steife aus. Der Reißfortschritt wurde bis zum Erreichen der beiden nächstliegenden Steifen verfolgt.

Aus den Reißlängenmessungen während des Versuches wurde der Verlauf der Reißfortschrittsgeschwindigkeit ermittelt. Dabei zeigte sich, daß der Reißfortschritt durch die vorhandenen Steifen nur dann behindert wurde, wenn der Reiß nicht durch das Abschweißloch eines Profilstoßes lief. Hinter der Steife wurden dafür um so höhere Reißfort-

schrittsgeschwindigkeiten beobachtet. Erhebliche Riverzgerungsphasen verursachten die bei fortschreitender Rißlänge vorgenommenen Lastreduzierungen.

Ergänzend zu den Versuchen wurden die Spannungsintensitätsfaktoren mit Hilfe der Methode der finiten Elemente berechnet, wobei vereinfachend eine Scheibenidealisierung, ein geradliniger Rißverlauf und linear-elastisches Verhalten angesetzt wurden.

Mit den Rißfortschrittsgeschwindigkeiten und zugehörigen Spannungsintensitätsfaktoren konnte ein Vergleich mit anderen Ergebnissen im üblichen doppeltlogarithmischen Diagramm vorgenommen werden. Die nach einer Lastreduktion aufgetretenen Riverzgerungsphasen blieben dabei ausgeklammert.

Es zeigte sich, daß die gemessenen Rißfortschrittsgeschwindigkeiten am unteren Rand eines Streubandes für 14 verschiedene Sthle aus der Literatur liegen. Zusätzliche Rifortschrittmessungen an Kleinproben des verwendeten Werkstoffes lieferten dagegen Ergebnisse eher im mittleren Bereich des Streubandes, wenn auch bei kleineren Geschwindigkeiten.

Der Grund für dieses unterschiedliche Verhalten wird darin gesehen, daß das Rißwachstum bei den großen Modellen überwiegend im ebenen Spannungszustand mit relativ großen plastischen Zonen stattfand, während bei den Kleinproben der ebene Dehnungszustand mit kleineren plastischen Zonen vorlag. Gestützt wird diese Erklärung durch die beobachteten schrägen Rißflanken und durch Messungen zu dem stark ausgeprägten Rischlieen. Auch in der Literatur finden sich Hinweise über geringere Rißfortschrittsgeschwindigkeiten beim Übergang vom ebenen Dehnungs- zum ebenen Spannungszustand. Hier wird noch ein Ansatzpunkt für weiterführende Untersuchungen gesehen.

Unter Berücksichtigung dieses Verhaltens stehen die Ergebnisse in gutem Einklang zu den bisherigen Erkenntnissen zum Rißfortschrittsverhalten von Sthlen. Die Möglichkeiten zur Vorausbestimmung des Rißfortschritts in versteiften Plattenfeldern werden damit bestätigt, wobei die Untersuchungen gezeigt haben, daß sich mehrere Einflüsse offenbar nicht oder nur wenig auswirken:

- die erheblichen Vereinfachungen im Rechenmodell (Scheibenidealisierung, geradliniger Rißverlauf, ideal-elastisches Verhalten),
- die Vorverformungen, die in den Versuchsmodellen eine stark gestörte Spannungsverteilung hervorgerufen haben, und
- die fertigungsbedingten Eigenspannungen, wie sie in den Versuchsmodellen vorgelegen haben müssen.

Überdies haben die Finite-Element-Berechnungen gezeigt, daß der Spannungsintensitätsfaktor aus den Formeln für unversteifte Platten näherungsweise abgeleitet werden kann, wodurch sich Abschätzungen auf bruchmechanischer Basis erheblich vereinfachen können. Mit stärkeren Abweichungen muß lediglich bei großen Verhältnissen der Steifenquerschnittsfläche zur Plattenquerschnittsfläche zwischen den Steifen gerechnet werden.

## 6 Literatur

1. NN.:  
"Report of Committee III.3: Fabrication Factors Affecting Structural Capability of Ships and other Marine Structures".  
6th Int. Ship Structures Congress, Boston 1976.
2. Schwalbe, K.H.:  
"Bruchmechanik metallischer Werkstoffe".  
Carl Hanser Verlag, München und Wien 1980.
3. Poe, C.C. Jr.:  
"Fatigue Crack Propagation in Stiffened Panels".  
Damage Tolerance in Aircraft Structures, ASTM STP 486, American Society for Testing and Materials, 1971.
4. Vlieger, H.:  
"The Residual Strength Characteristics of Stiffened Panels Containing Fatigue Cracks".  
Engineering Fracture Mechanics, Vol. 5, 1973.
5. Kanazawa, T.; Watanabe, M.; Yajima, H.; Kawano, H.:  
"Fracture Tolerance Analysis of a Fundamental Element in Steel Structures".  
Proc. US-JAPAN Cooperative Seminar on Fracture Tolerance Evaluation, Honolulu 1981.
6. Rossmannith, H.-P. (Hrsg):  
"Finite Elemente in der Bruchmechanik".  
Springer-Verlag, Berlin 1982.
7. Owen, D.R.J.; Fawkes, A.J.:  
"Engineering Fracture Mechanics: Numerical Methods and Applications".  
Pineridge Press, Swansea UK, 1983.
8. Fricke, W.:  
"Zuverlässigkeitsberechnungen für schiffbauliche Konstruktionselemente".  
22. Fortbildungskurs am Institut für Schiffbau, Hamburg 1986.

9. Fricke, W.:  
 "Untersuchungen zur Schwingfestigkeit von Längsspannstößen aus HP-Profilen".  
 Schiff & Hafen, Jrg. 38, 1986, Heft 2 sowie IfS-Bericht 462, Institut für Schiffbau,  
 Hamburg 1985.
10. Bathe, K.J.; Wilson, E.; Peterson, F.E.; Wunderlich, W.:  
 "SAPIV - Beschreibung und Benutzerhandbuch".  
 Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen Nr. 75/14 der Ruhr-Universität Bochum  
 1985.
11. NN.:  
 "Standard Test Method for Constant-Load-Amplitude Fatigue Growth Rates above  
 $10^{-8}$  m/Cycle".  
 ASTM E 647/81, American Society for Testing and Materials, Philadelphia 1981.
12. Maddox, S.J.; Gurney, T.R.; Mummery, A.M.; Booth, G.S.:  
 "An Investigation of the Influence of Applied Stress Ratio on Fatigue Crack Pro-  
 pagation in Structural Steels".  
 Report 72/1978/E, The Welding Institute, IIW-Document XIII-973-80.
13. Henshell, R.D.; Shaw, K.G.:  
 "Crack Tip Finite Elements are Unnecessary".  
 International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 9, 1975.
14. Barsoum, R.S.:  
 "On the Use of Isoparametric Finite Elements in Linear Fracture Mechanics".  
 International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 10, 1976.
15. Drögemüller, F.:  
 "Bestimmung der Spannungsintensitätsfaktoren ebener Strukturen mit Hilfe der  
 Finite-Element-Methode".  
 Diplomarbeit am Institut für Schiffbau, Hamburg 1983.
16. Petershagen, H.; Fricke, W.:  
 "Bruchmechanische Behandlung von Problemen der Schwing- und Betriebsfestig-  
 keit".  
 21. Fortbildungskurs am Institut für Schiffbau, Hamburg 1985.
17. Barsoum, R.S.:  
 "Triangular Quarter-Point Elements as Elastic and Perfectly-Plastic Crack Tip  
 Elements".  
 International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 11, 1977.

18. NN.:  
"ADINA - A Finite Element Program for Automatic Dynamic Incremental Non-linear Analysis".  
Report AE 81-1, ADINA-Engineering, Westeras (SCHWEDEN) 1981.
19. Elber, W.:  
"The Significance of Fatigue Crack Closure".  
Damage Tolerance in Aircraft Structures, ASTM STP 486,  
American Society for Testing and Materials, 1971.
20. Gurney, T.R.:  
"Fatigue of Welded Structures".  
Cambridge University Press, Cambridge (UK) 1979.
21. Radaj, D.:  
"Gestaltung und Berechnung von Schweißkonstruktionen - Ermüdungsfestigkeit".  
Fachbuchreihe Schweißtechnik, Band 82, Deutscher Verlag für Schweißtechnik  
1985.

	Chemische Zusammensetzung [%]				
	C	Si	Mn	P	S
Platte 8 mm <sup>1)</sup> (Modell 1)	.08	.20	1.12	.024	.007
Platte 7 mm <sup>1)</sup> (Modell 2)	.15	.26	.67	.022	.017
Profil HP120x7 <sup>2)</sup>	.10	.17	.63	.024	.027

	Probe	Streckgrenze	Zugfestigkeit	Bruchdehnung
	Nr.	ReH [N/mm <sup>2</sup> ]	Rm [N/mm <sup>2</sup> ]	A5 [%]
Platte 8 mm <sup>1)</sup> (Modell 1)	1	335	467	36
	2	328	469	35
Platte 7 mm <sup>1)</sup> (Modell 2)	1	315	436	35
	2	332	430	35
Profil HP120x7 <sup>2)</sup>	1	354	475	40

1) Entspr. Untersuchungsergebnis des  
Materialprüfungsamtes an der FH Hamburg

2) Lt. Prüfzertifikat Det Norske Veritas

Tabelle 1 : Werkstoffdaten

Last- wechsel- Zahl n		RiBlänge a, a <sub>1</sub> , a <sub>2</sub> [mm]			Δσ [N/mm <sup>2</sup> ]		Last- wechsel- Zahl n			RiBlänge a, a <sub>1</sub> , a <sub>2</sub> [mm]			
		Platte	Seite a	Seite b	1	2a	2b	Platte	Seite a	Seite b	1	2a	2b
0		18.0	17.5					204.5	215.0				
5 000		18.5	18.0					215.0	225.0				
10 000		19.0	18.5					225.0	236.0				
15 000		20.5	20.5					236.0	246.5				
20 000		23.5	22.5					247.0	257.5			7.0	
24 600		24.5	24.5					258.5	269.5			8.5	
30 000		26.5	25.5					272.0	283.0			9.5	
40 000		30.5	28.5					284.0	296.0			10.5	
55 000		35.5	34.5					300.5	310.0			11.5	7.0
62 000						(Anriß sichtbar)		341.5	353.5			13.0	8.5
65 200		40.5	40.5			10.0		357.0	358.5			14.5	10.0
70 200		43.5	43.5			11.5		363.0	363.5			15.5	11.0
75 200		46.5	47.0			15.5		367.5	367.0			16.5	12.0
80 000		49.5	51.0			18.5		372.5	370.5			18.0	13.0
85 000		53.5	55.0			21.0		380.0	376.0			20.0	14.0
90 000		57.5	59.5			24.0		390.0	384.0			21.5	15.5
95 000		61.0	64.0			28.0		406.5	394.5			24.5	17.5
100 000		64.0	68.0			31.5		422.5	405.5			31.5	19.5
105 000		68.0	72.5			35.5		455.0	(RiB unter			46.5	24.0
110 000		72.5	77.5			41.0		466.0	Steife 2b)			52.0	26.0
115 000		78.5	84.5			47.0		474.5				57.5	28.0
120 000		86.5	92.5			53.5		487.0				64.5	30.5
125 000		96.0	102.5			61.5		505.0	428.0			75.5	33.5
130 000		105.0	112.5			66.5		525.5	449.5			82.5	38.5
135 000		120.0	126.5			(fast		531.0	454.0			85.5	41.5
140 000		129.5	139.5			durchtrennt)		534.5	458.5			88.0	44.5
145 000		145.5	153.5					538.5	463.0			92.0	48.0
150 100		158.5	167.5					545.5	473.5			(durchtrennt)	52.5
155 100		161.0	170.0					553.0	487.0				59.5
160 100		163.0	173.0					564.5	502.0				66.0
165 100		164.5	174.5					575.5	518.5				71.5
170 100		165.5	175.5										
175 100		169.0	180.0										
180 100		174.0	185.0										
185 100		180.0	191.0										
190 100		187.5	198.0										
195 100		195.0	205.5										

Tabelle 2 : Gemessene RiBlängen beim Modell 1

$\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Last- wechsel- Zahl n	Rißlänge a, a <sub>1</sub> , a <sub>2</sub> [mm]				$\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Last- wechsel- Zahl n	Rißlänge a, a <sub>1</sub> , a <sub>2</sub> [mm]				
		Platte		Steife				Platte		Steife		
		Seite a	Seite b	1	2a			Seite a	Seite b	1	2a	2b
	0					190 000	325.0	339.5				
	2 600			17.0		195 000	344.0	359.5				
	6 450			23.0		200 000	348.5	362.5				
	10 100			31.0		205 000	351.0	366.0				
	11 100			51.5		210 000	353.5	368.5				
	11 820			65.0		215 000	355.5	370.5				
	16 100			(sichtbarer Anriß)		220 000	357.5	372.0				
	38 200			(Riß an Plattenunterseite)		225 000	359.5	373.5				
	45 000			21.0		230 000	362.0	375.5				
	50 000			24.5		235 000	365.0	378.0				
	55 000			29.5		240 000	368.0	380.5				
	60 000			33.5		245 000	371.5	383.5				
	65 000			40.5		250 000	375.5	386.5				
	70 000			46.5		255 000	379.5	389.5				
	75 000			53.0		260 000	384.0	392.5				
	80 000			60.0		265 000	388.5	396.0				
	85 000			67.0		270 000	393.5	399.5				
	90 000			73.5		275 000	399.5*	402.0*				
	95 000			81.0		280 000	405.0*	405.5*				
	100 000			91.0		285 000	410.0*	409.0*				
	105 000			100.5		290 000	413.5*	412.5*				
	110 000			113.5		295 000	418.0*	417.0*				
	115 000			127.0		300 000	423.0*	421.5*				
	120 000			142.5		305 000	429.0*	424.5*				
	125 000			160.5		310 000	442.0*	435.5*				
	130 000			177.5		315 000	467.0	455.0				
	135 000			196.0		320 000	492.0	497.0				
	140 000			202.0		324 000	513.0	501.0				
	145 000			210.0		330 000	556.0	534.0				
	150 000			219.5		335 000	591.0	564.5				
	155 000			229.0		340 000	600.0	573.0				
	160 000			241.5		345 000	610.0	580.0				
	165 000			253.5		350 000	622.0	598.0				
	170 000			266.0		355 000	637.5	618.0				
	175 000			279.0		360 000	655.5	638.0				
	180 000			292.5		365 000	676.0	660.5				
	185 000			308.0		370 000	697.5	684.0				
												6.0
												20.5
												39.0
												63.0
												81.0
												101.0
												113.5
												(durchtrennt) 111.0
												114.0
												(durchtrennt)

\* Rißlänge an der Plattenunterseite

Tabelle 3 : Gemessene Rißlängen beim Modell 2

Modell 1

Last- wechsel- zahl n	$\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Seite a		Seite b	
		a [mm]	$U_{O^{2\lambda}}$	a [mm]	$U_{O^{2\lambda}}$
175 100	118	169.0	~0.50	180.0	0.55
210 000	118	227.0	0.59	236.0	0.56
250 000 <sup>1)</sup>	90	357.0	0.52	358.5	0.48
385 000	76	525.5	0.75	459.5	0.70

Modell 2

Last- wechsel- zahl n	$\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Seite a		Seite b	
		a [mm]	$U_{O^{2\lambda}}$ ( $U_U$ )	a [mm]	$U_{O^{2\lambda}}$ ( $U_U$ )
85 000	133	67.0	0.76 ( 0.88)	72.0	~0.65 ( - )
120 000	133	142.5	0.77 (~0.45)	154.0	0.78 (~0.65)
175 000	113	279.0	0.66 (~0.55)	293.0	0.68 ( 0.58)

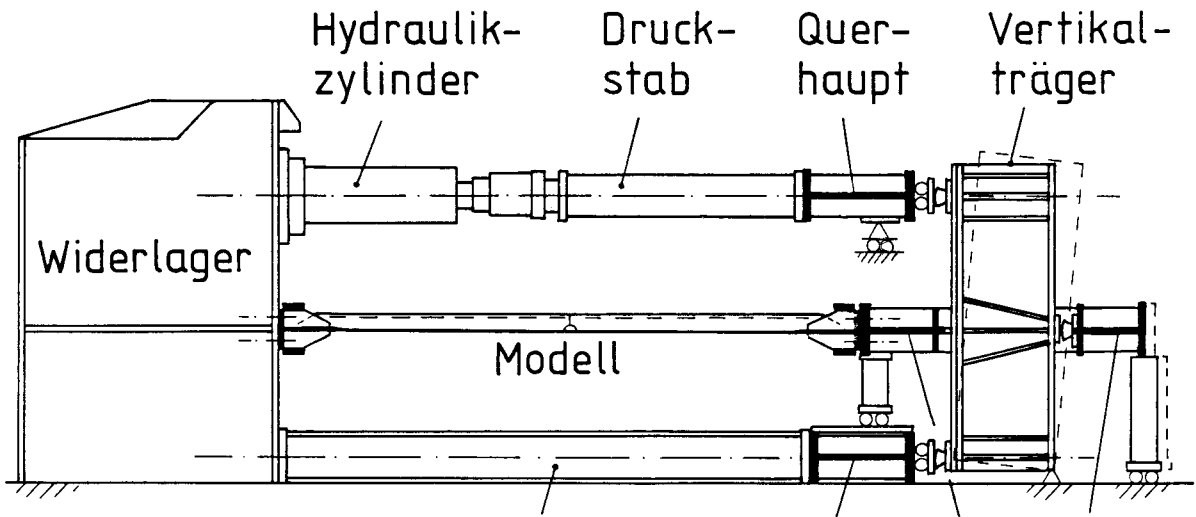
<sup>1)</sup> Messung kurz nach Lastreduktion

<sup>2)</sup>  $U = (\text{Lastschwingbreite bei geöffneter Riß}) /$   
(gesamte Lastschwingbreite)

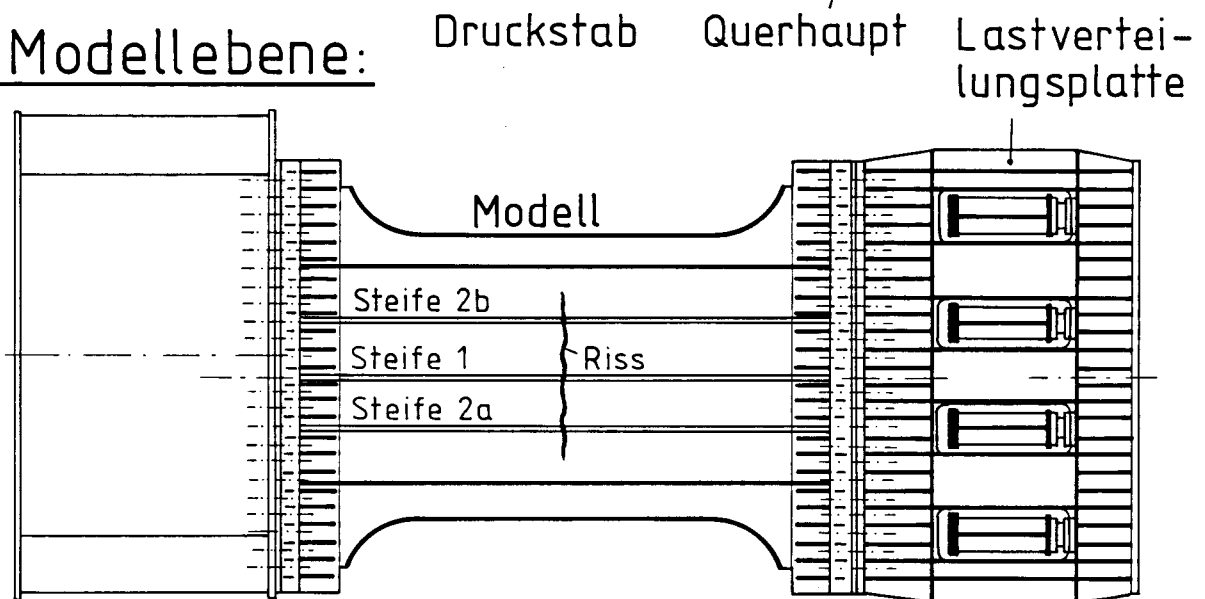
$U_O$  an der Plattenoberseite,  $U_U$  an der Plattenunterseite

Tabelle 4 : Gemessener Rißöffnungsanteil  $U$   
bei verschiedenen Rißlängen

## Längsschnitt / Seitenansicht:



## Modellebene:



## Ansicht von oben:

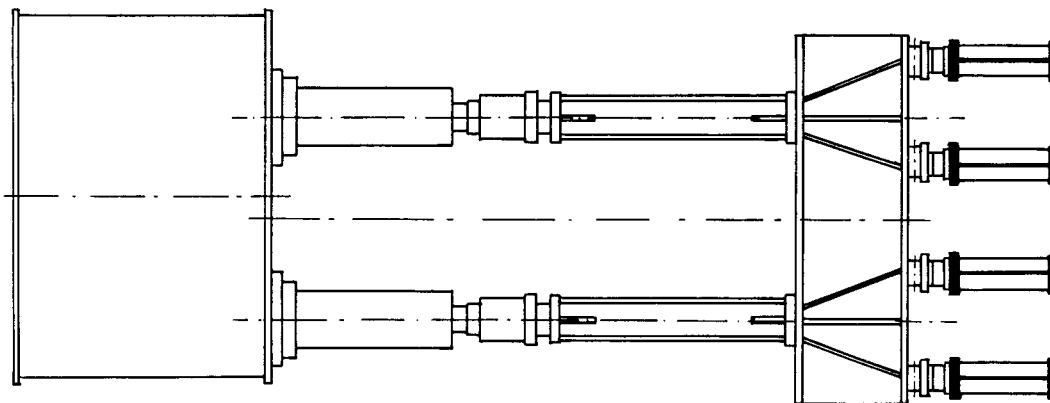


Bild 1 : Versuchsaufbau

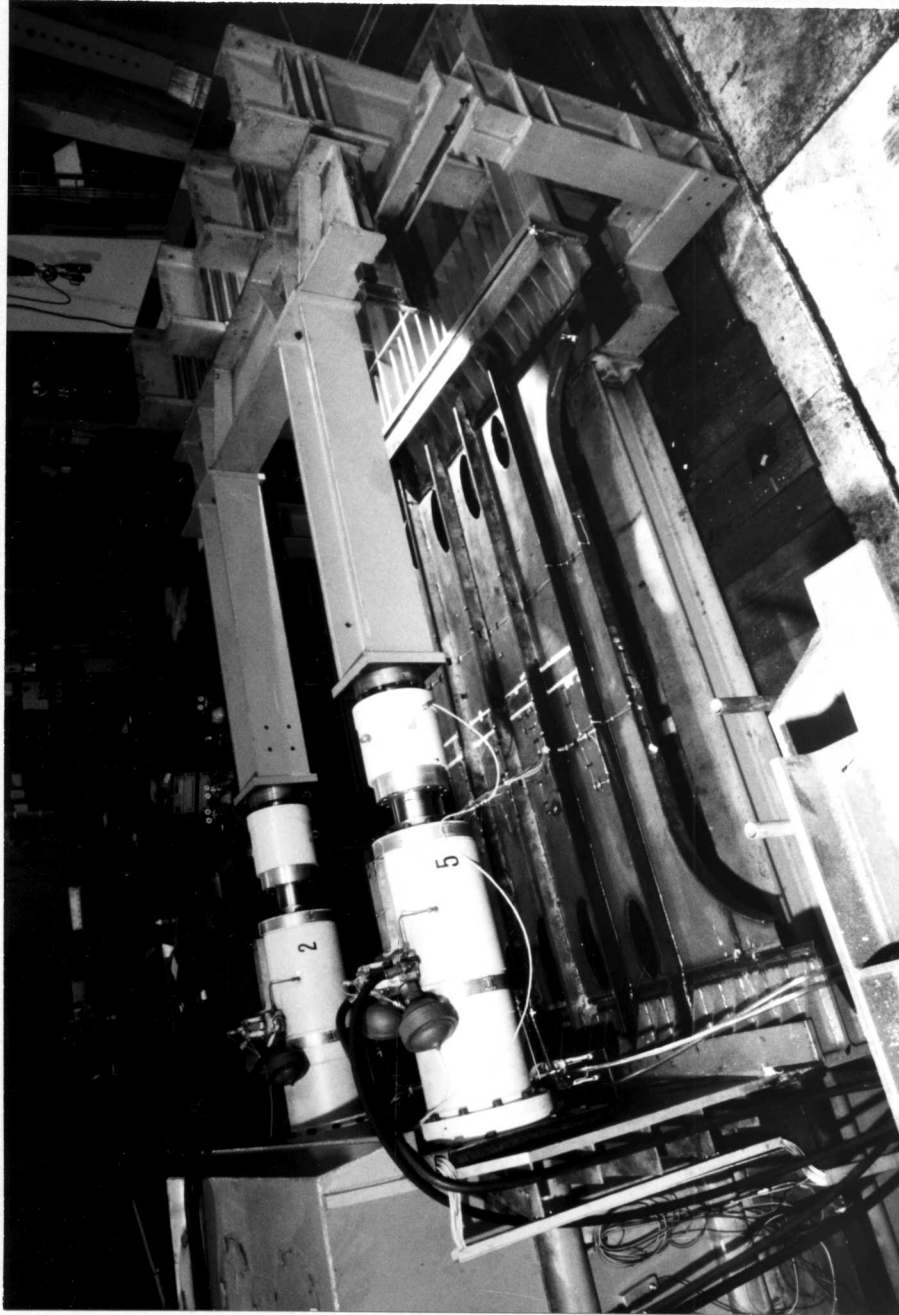


Bild 2 : Versuchsaufbau

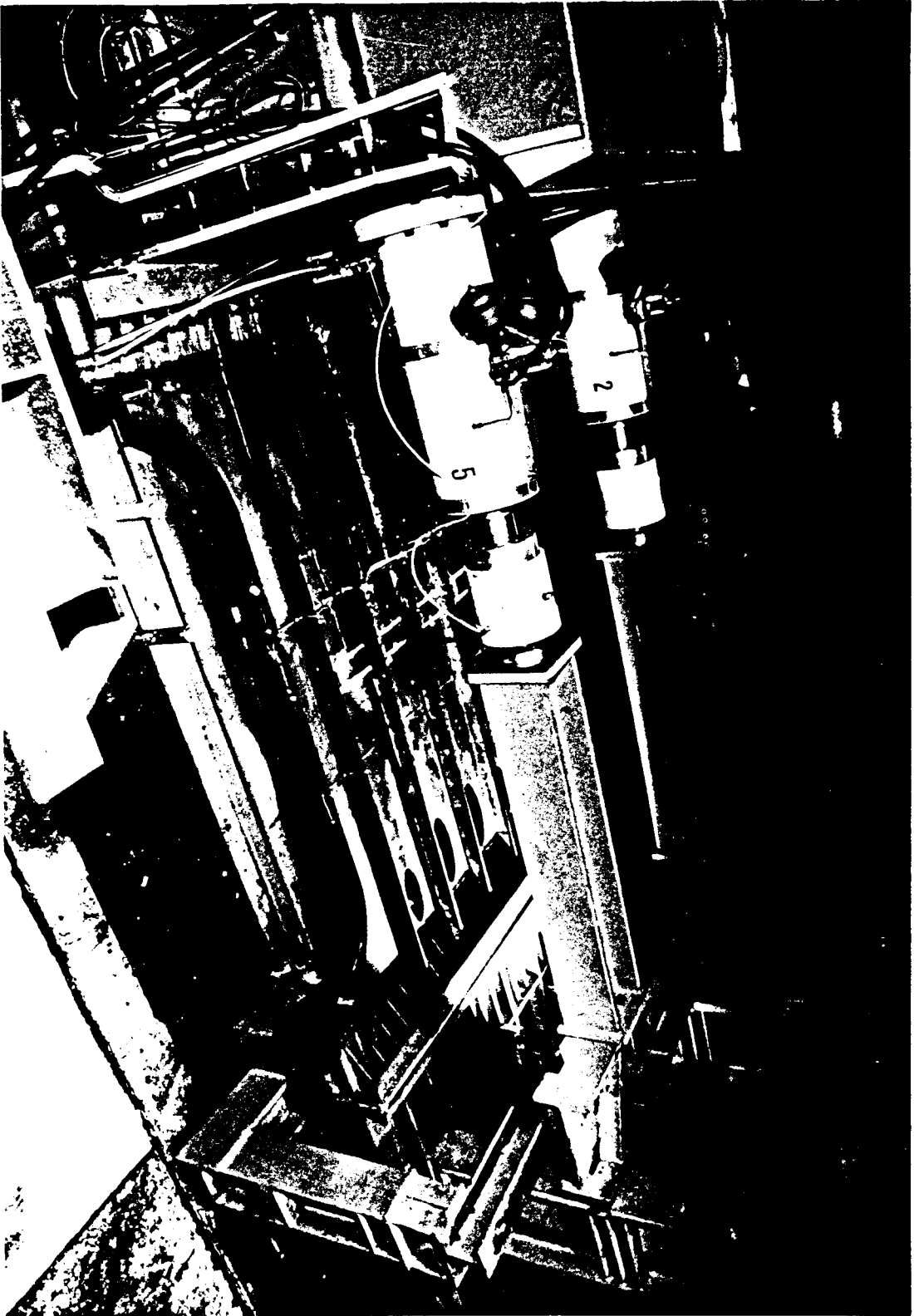
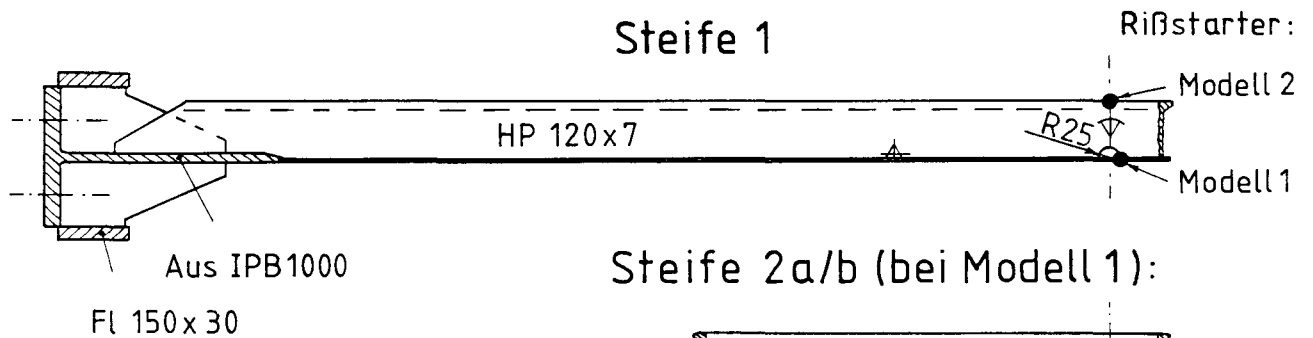
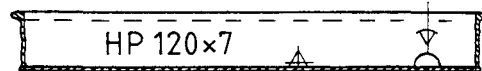


Bild 2 : Versuchsaufbau

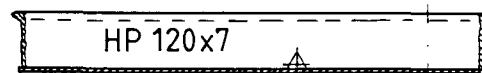
# Längsschnitt:



Steife 2a/b (bei Modell 1):



Steife 2a/b (bei Modell 2):



# Draufsicht:

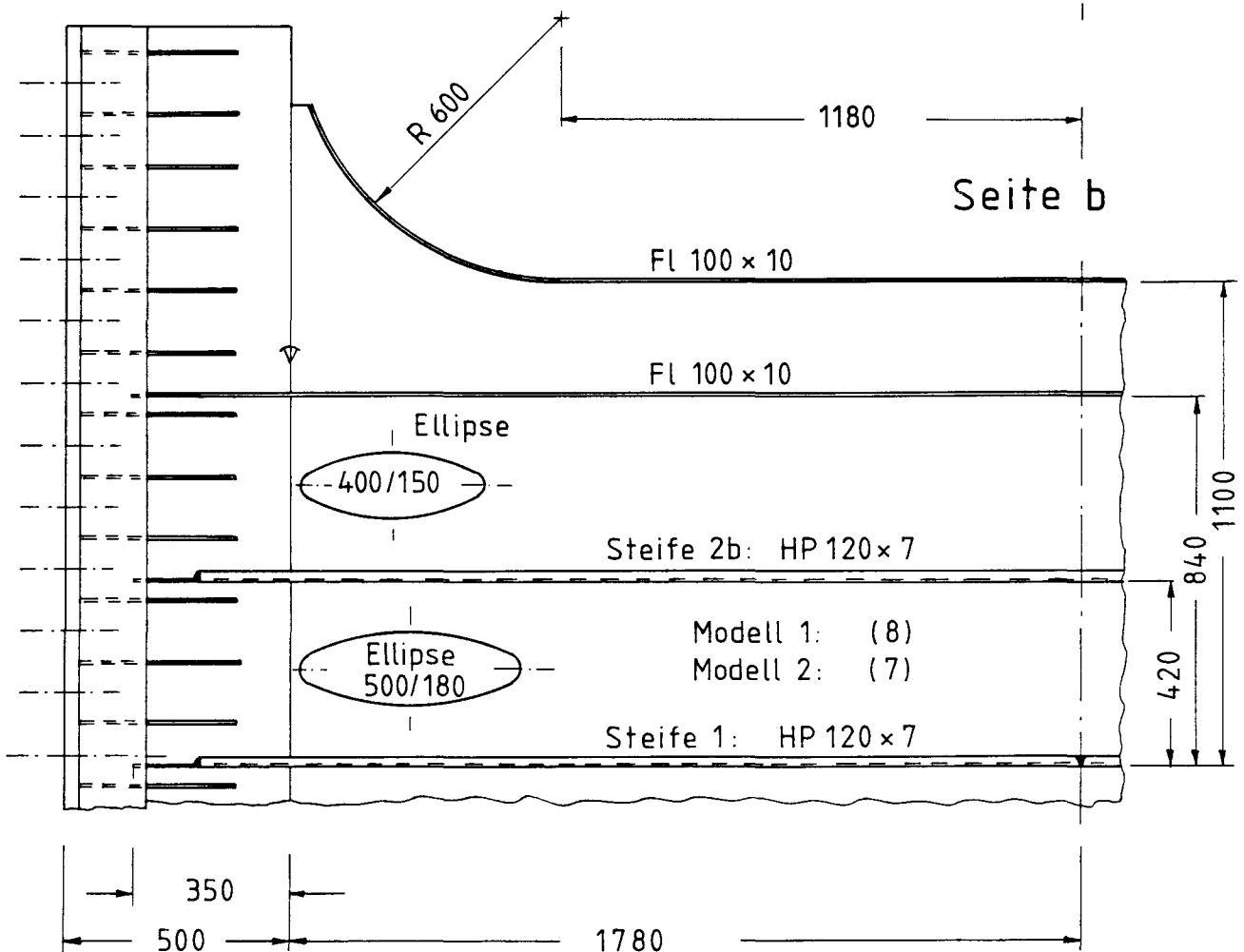


Bild 3 : Zur Konstruktion der Modelle 1 und 2

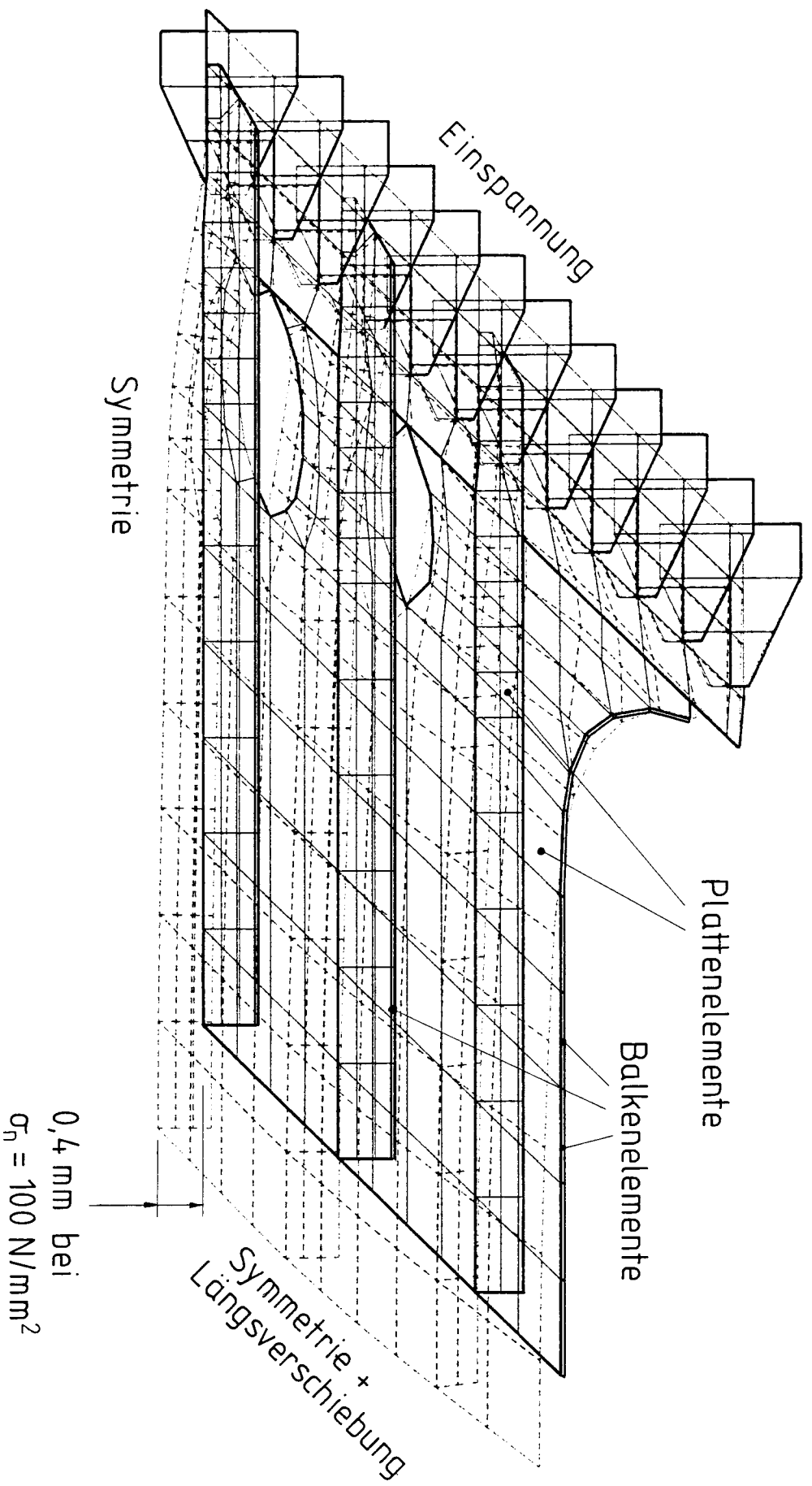


Bild 4 : Finite - Element - Idealisierung des Versuchsmodells

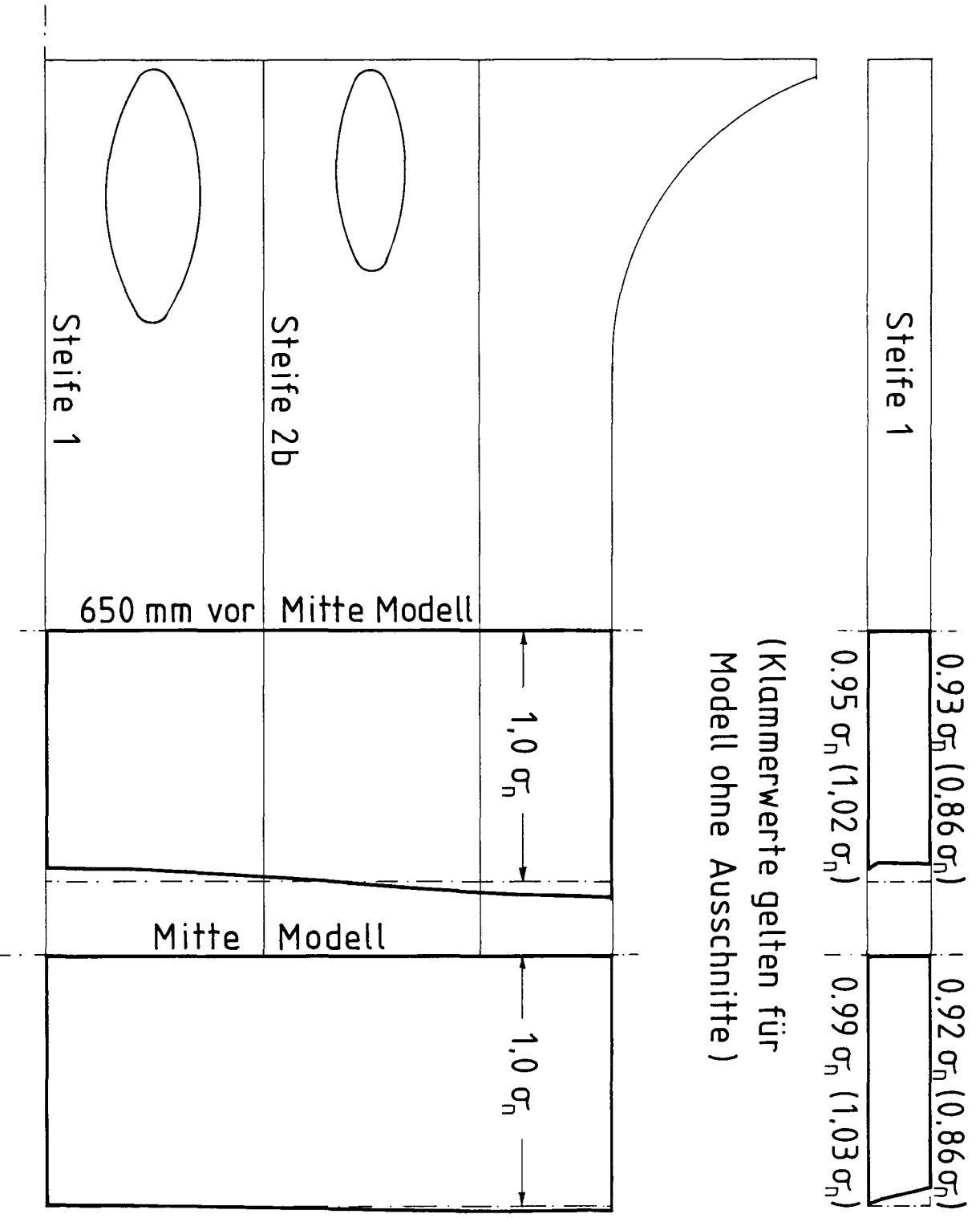


Bild 5 : Rechnerische Längsspannungen im Versuchsmodell

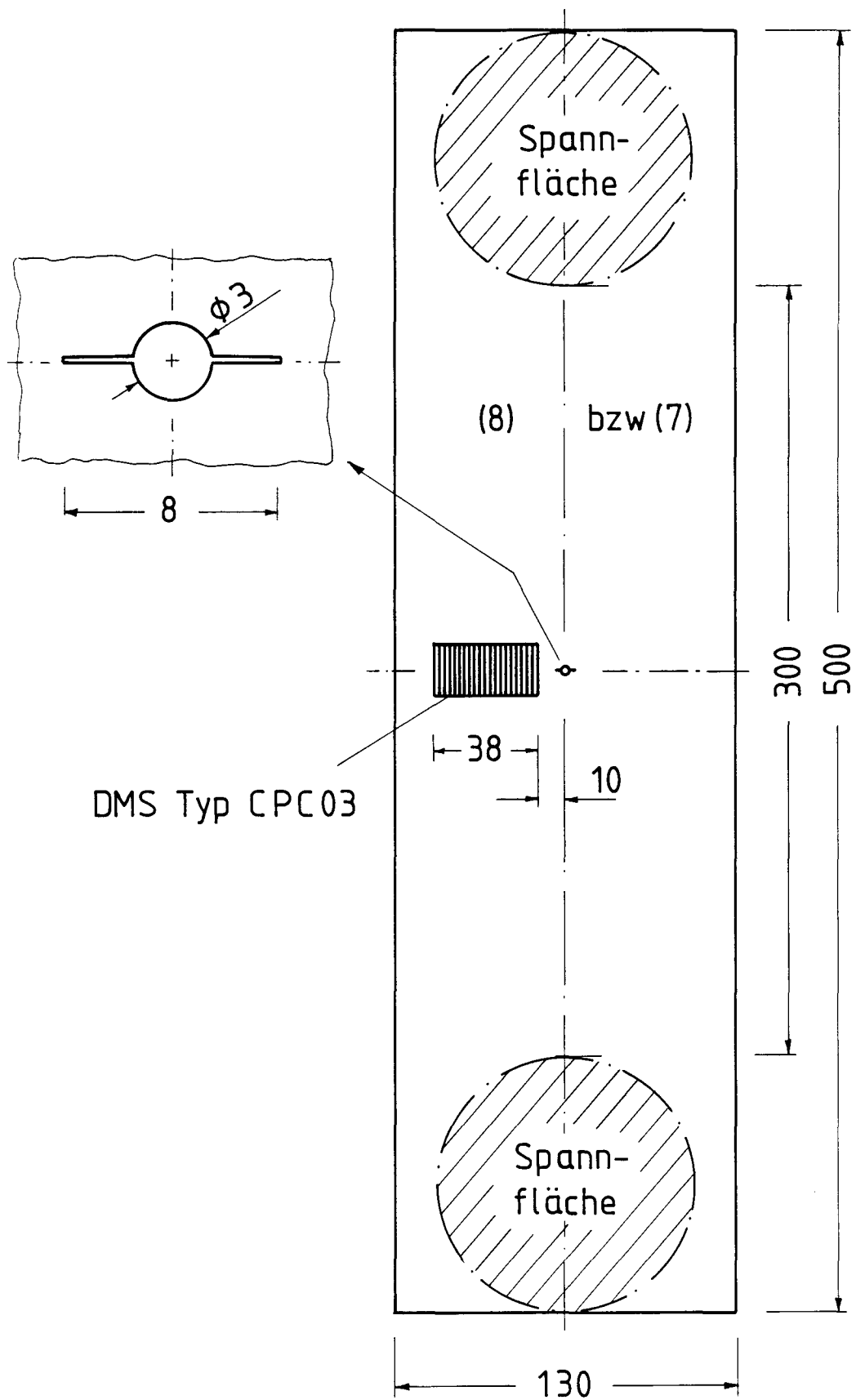


Bild 6 : Probenform für die Rißfortschrittsmessungen an den Kleinproben

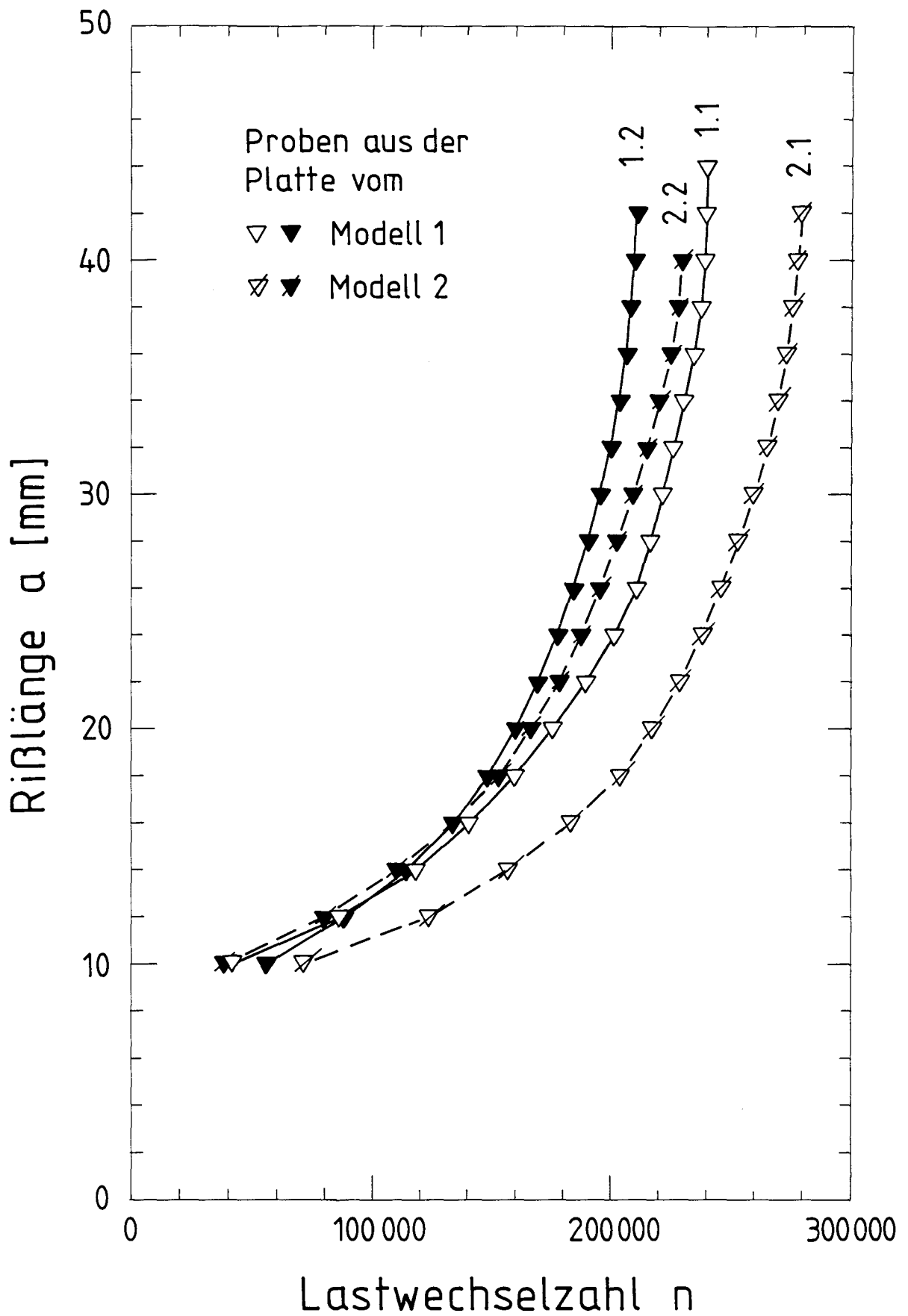


Bild 7 : Gemessene Rißlängen an den Kleinproben

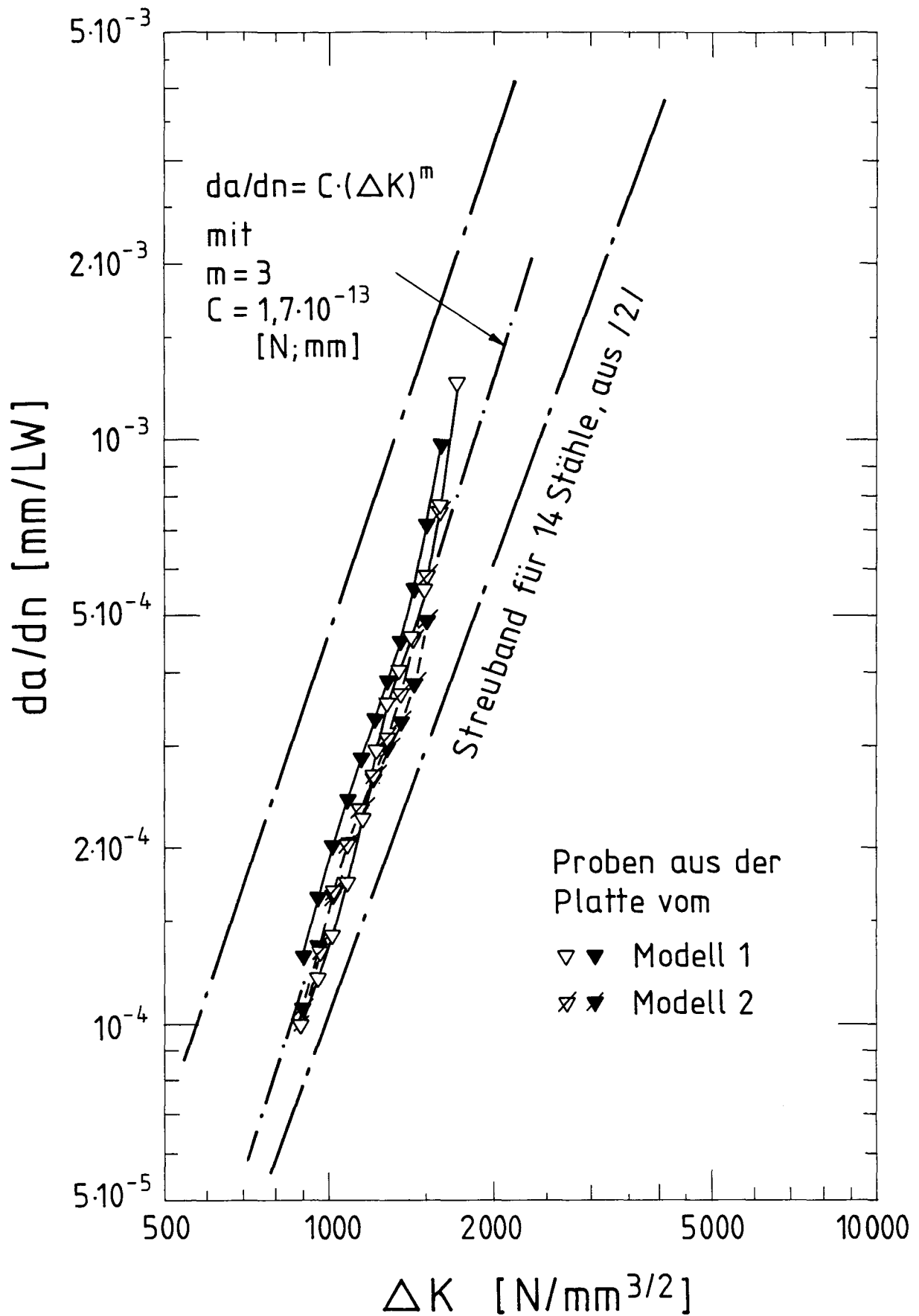


Bild 8 : Rißfortschrittsgeschwindigkeit  $da/dn$  aus den Kleinproben

# Modell 1

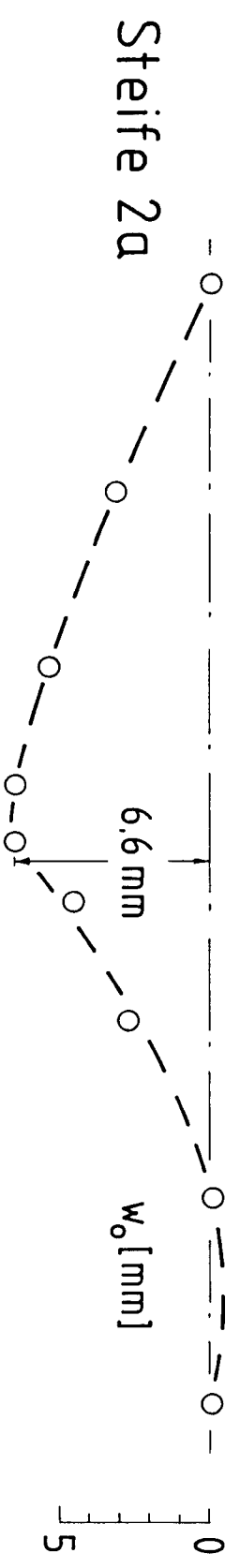
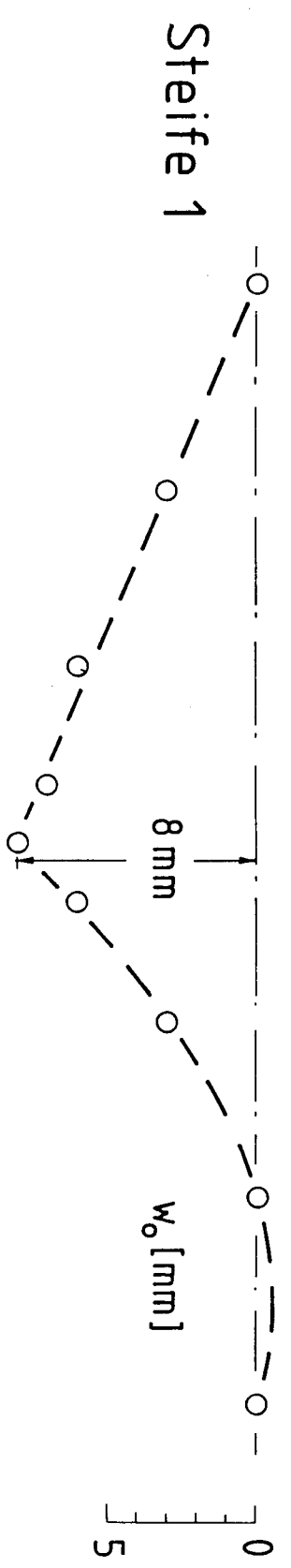
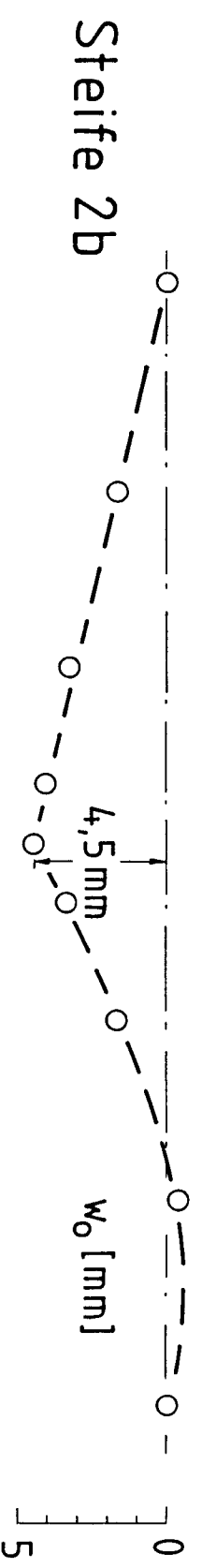
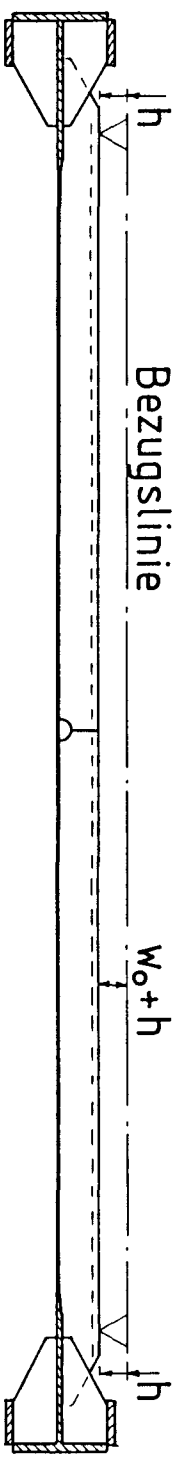


Bild 9 : Vorverformungen der Steifen des Modells 1

# Modell 2

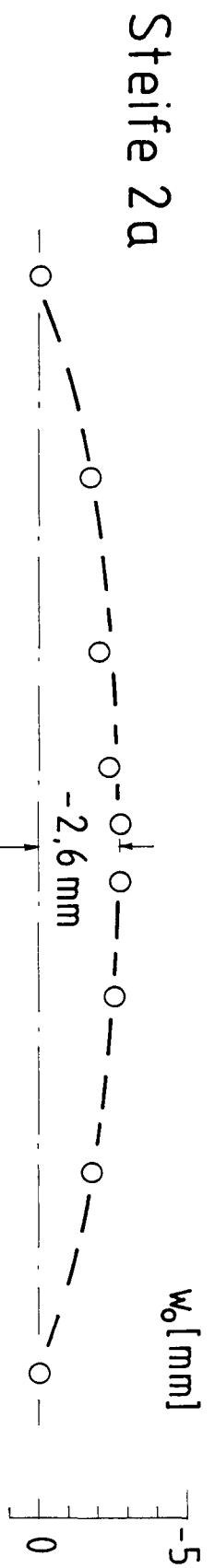
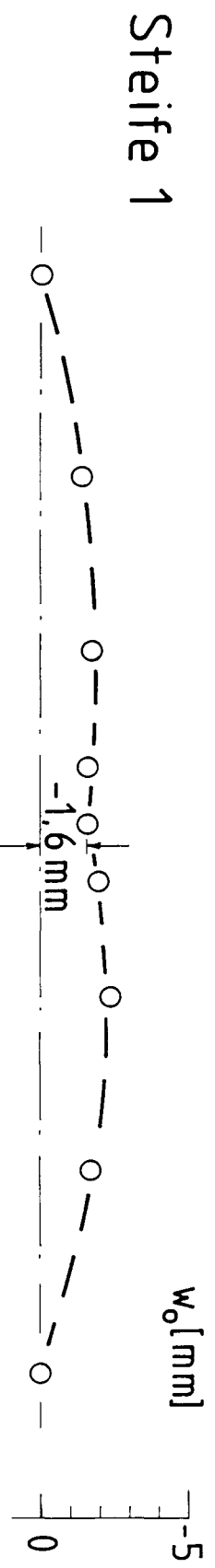
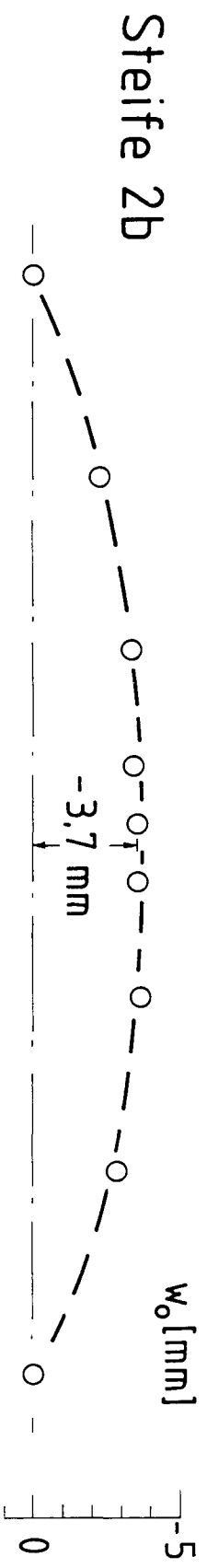
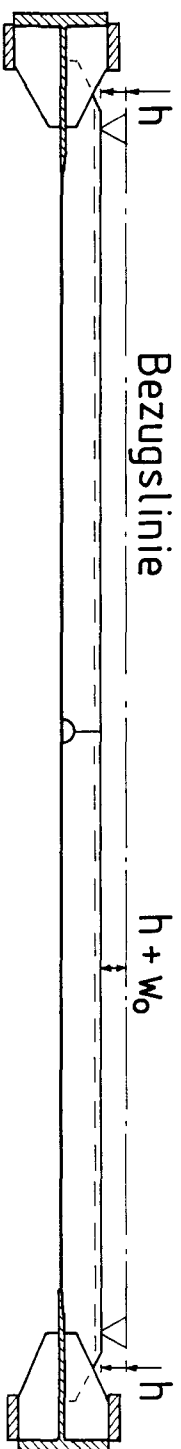
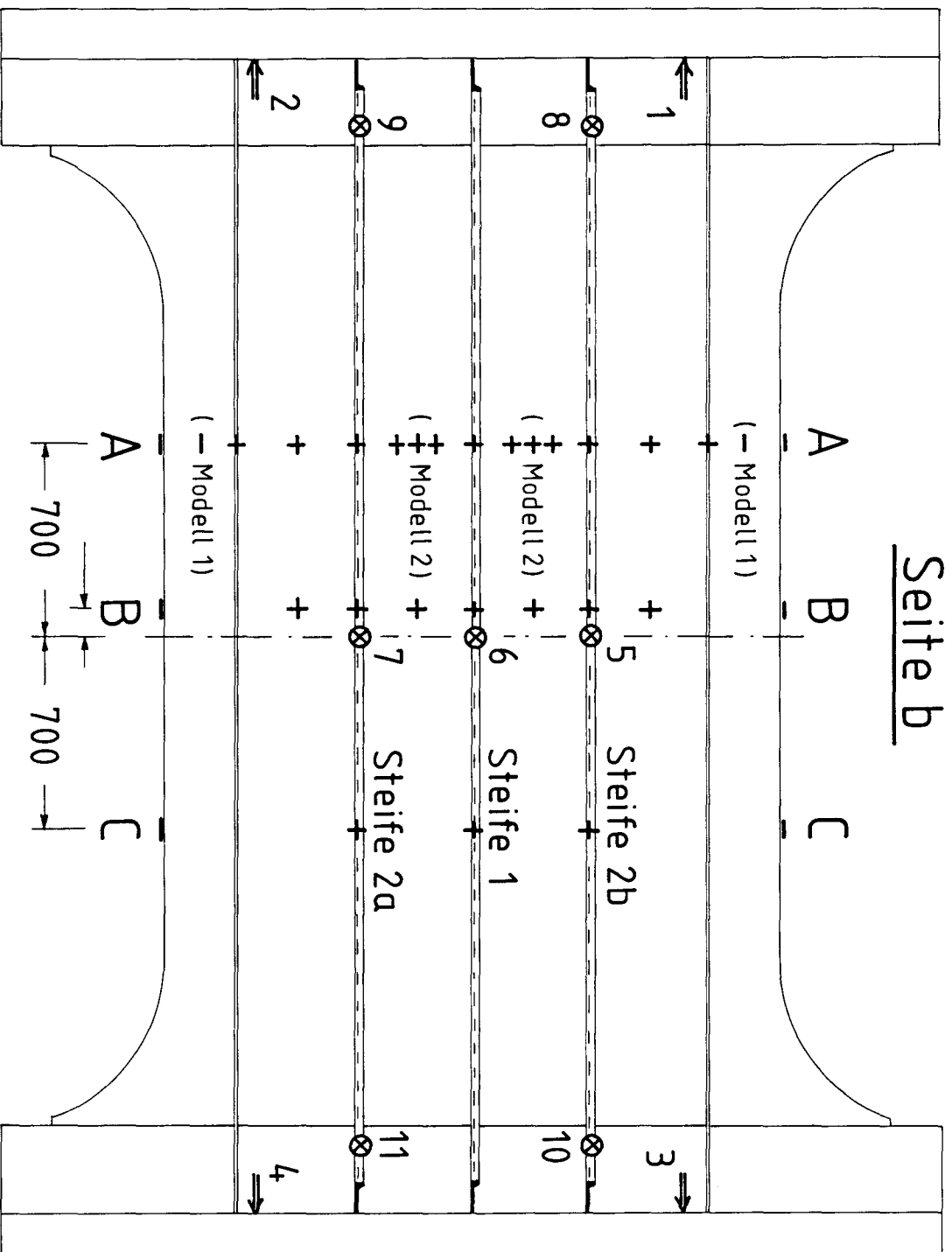


Bild 10 : Vorverformungen der Steifen des Modells 2

## Seite b



## Seite a

DMS:

- Linear
- + Zweiachsig

Wegeber:

- ⇒ horizontal
- ⊗ vertikal

(Anmerkung:  
DMS jeweils  
an Ober- und  
Unterseite;  
an Steifen-  
oberkanten  
lediglich  
lineare DMS)

## Rißstarter am Modell 1:

## Rißstarter am Modell 2:

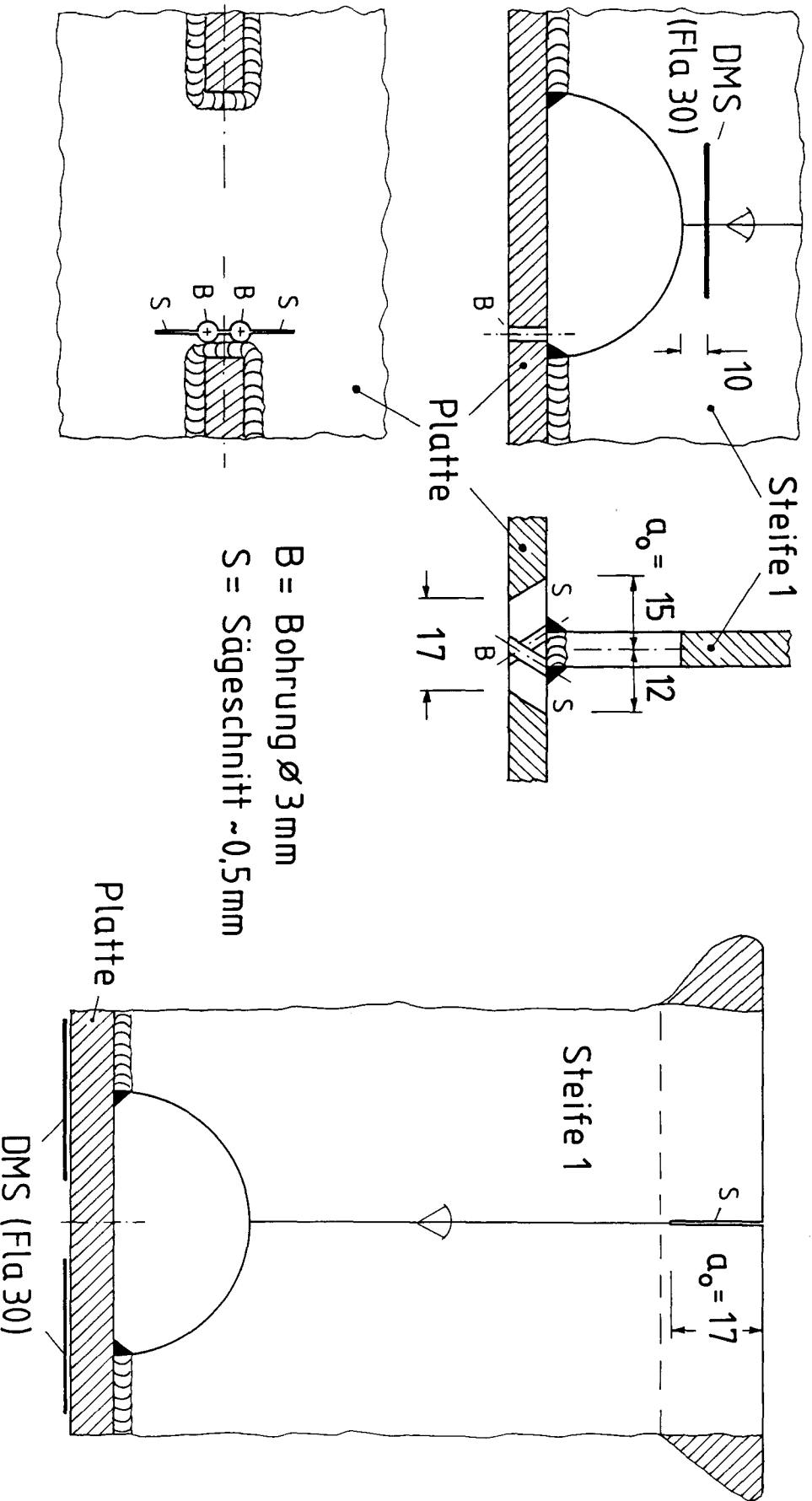


Bild 12 : Anordnung der Rißstarter

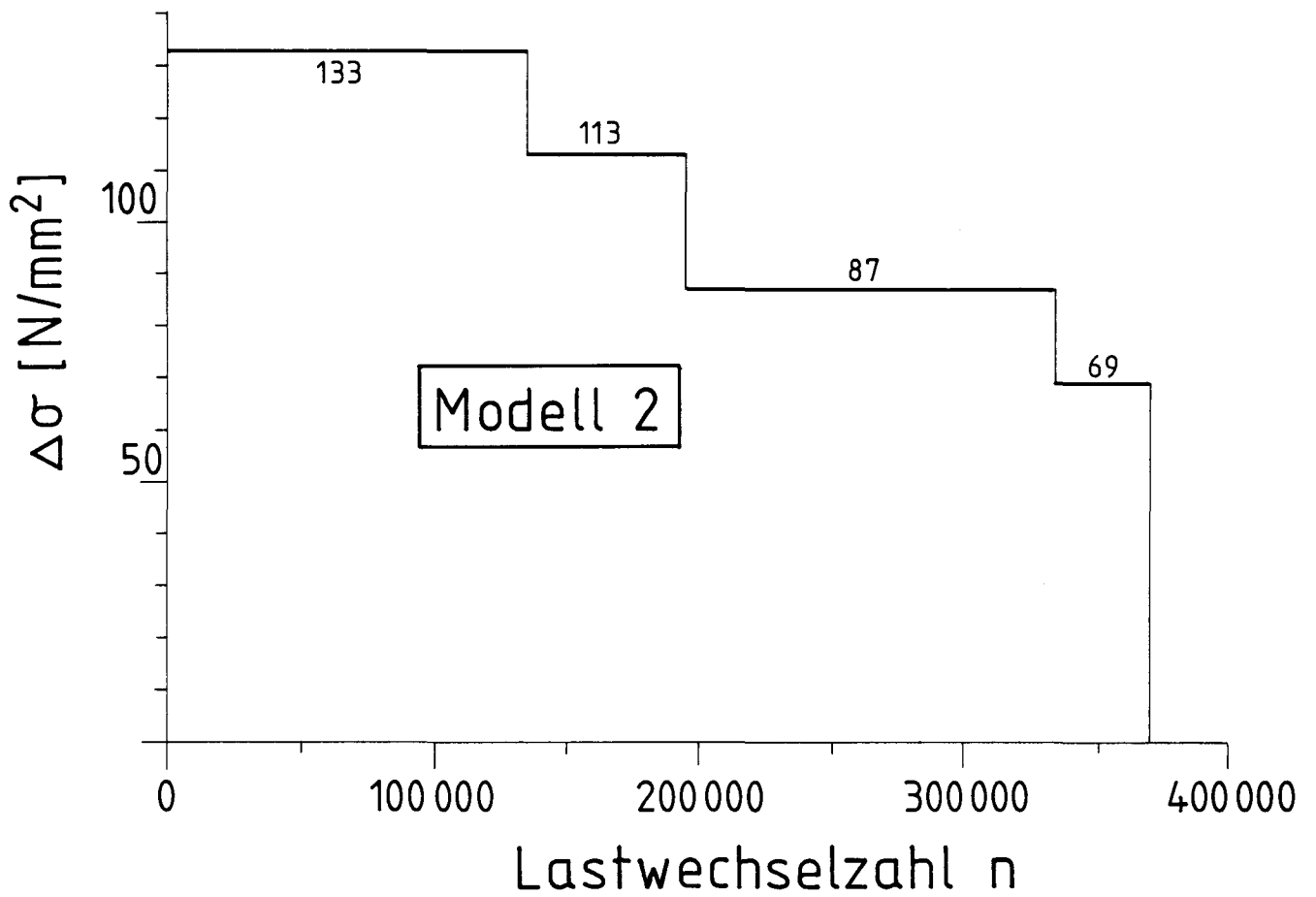
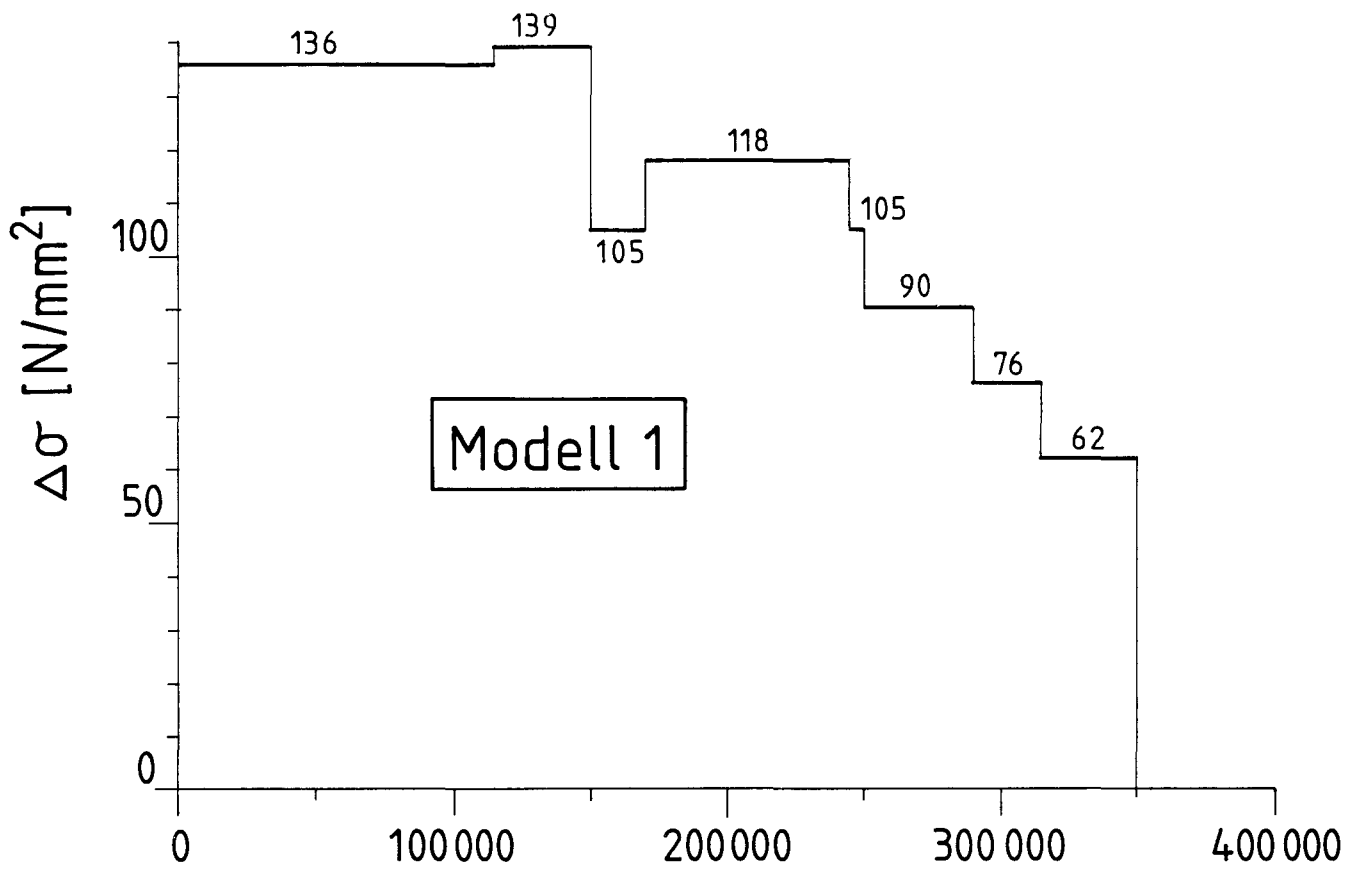
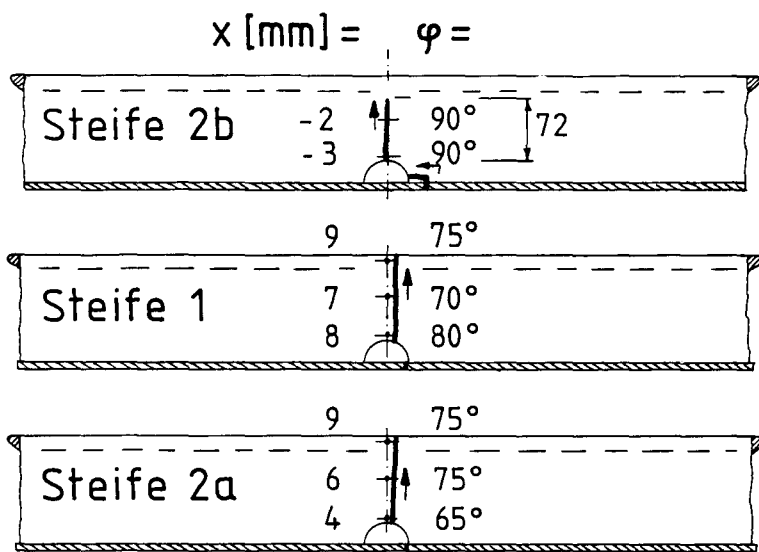
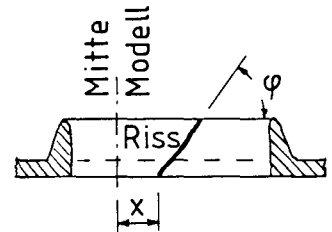


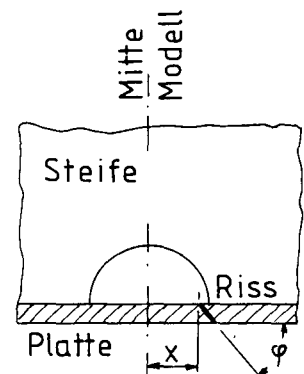
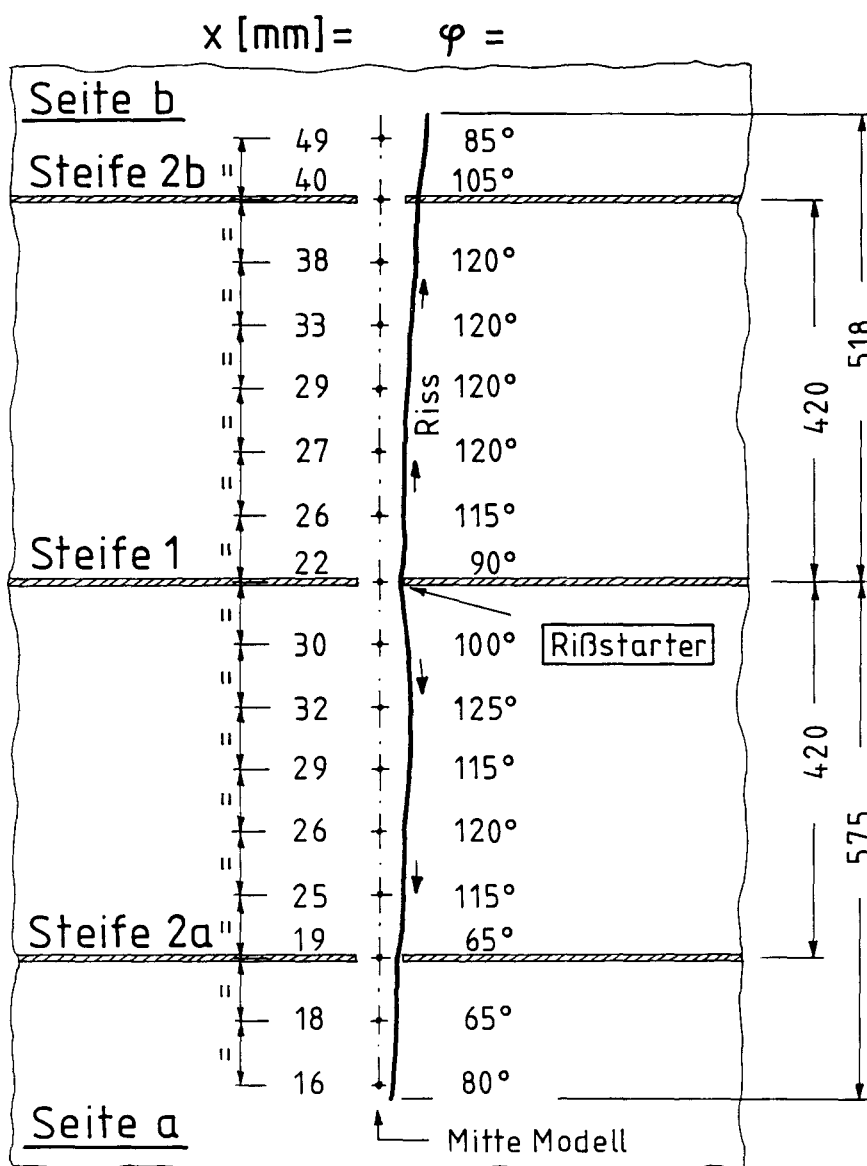
Bild 13 : Schwingbreite  $\Delta\sigma$  der Nennspannung im Versuchsablauf



**Modell 1**

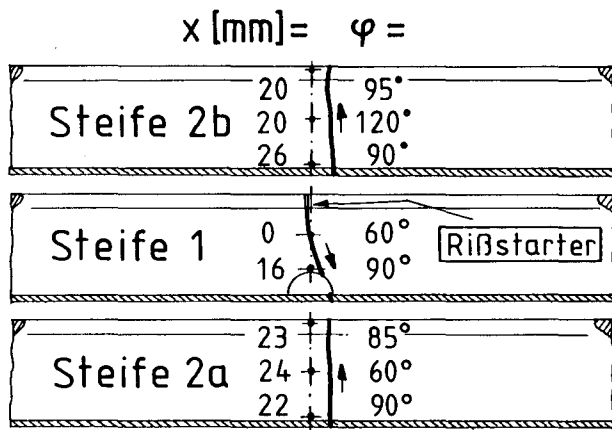


Riss in der Steife  
(v. o. gesehen)

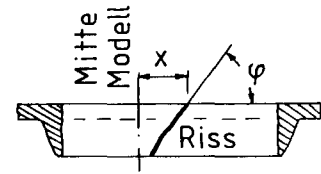


Riss in der Platte

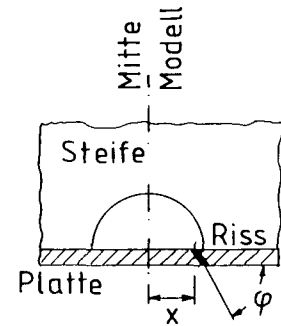
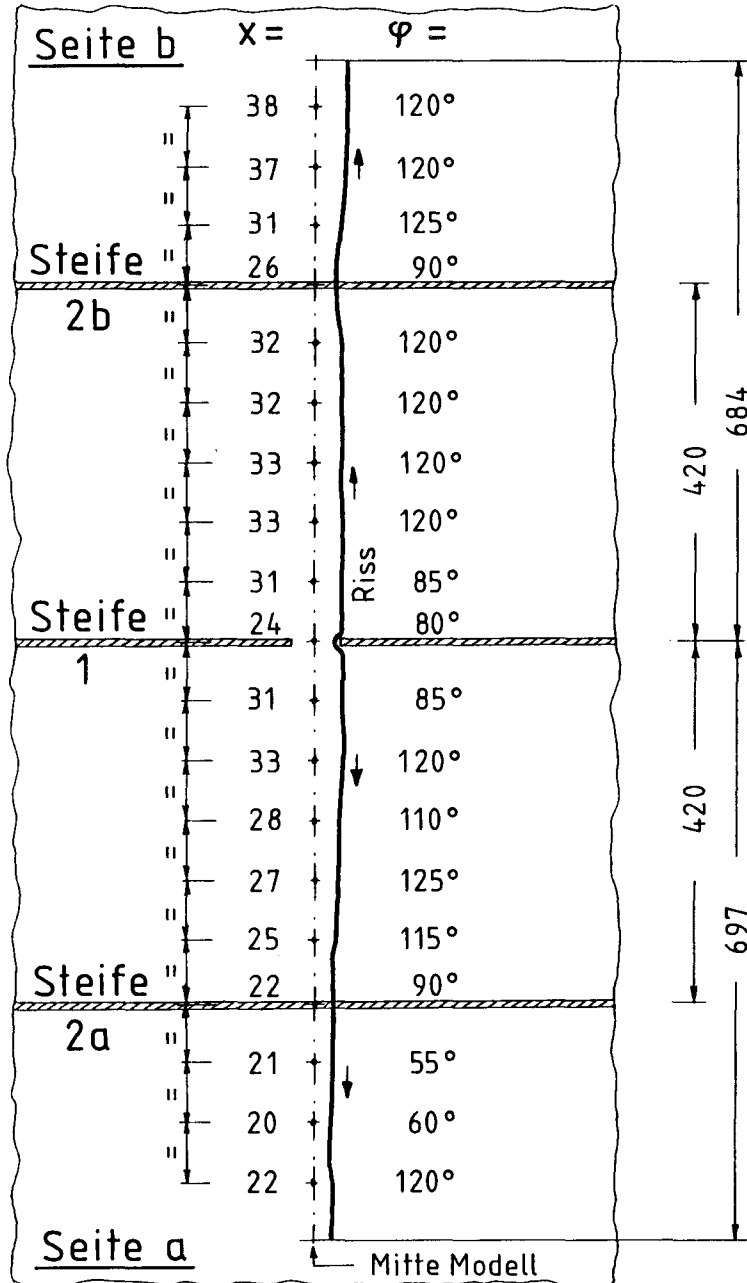
Bild 14 : RiBverlauf im Modell 1



## Modell 2

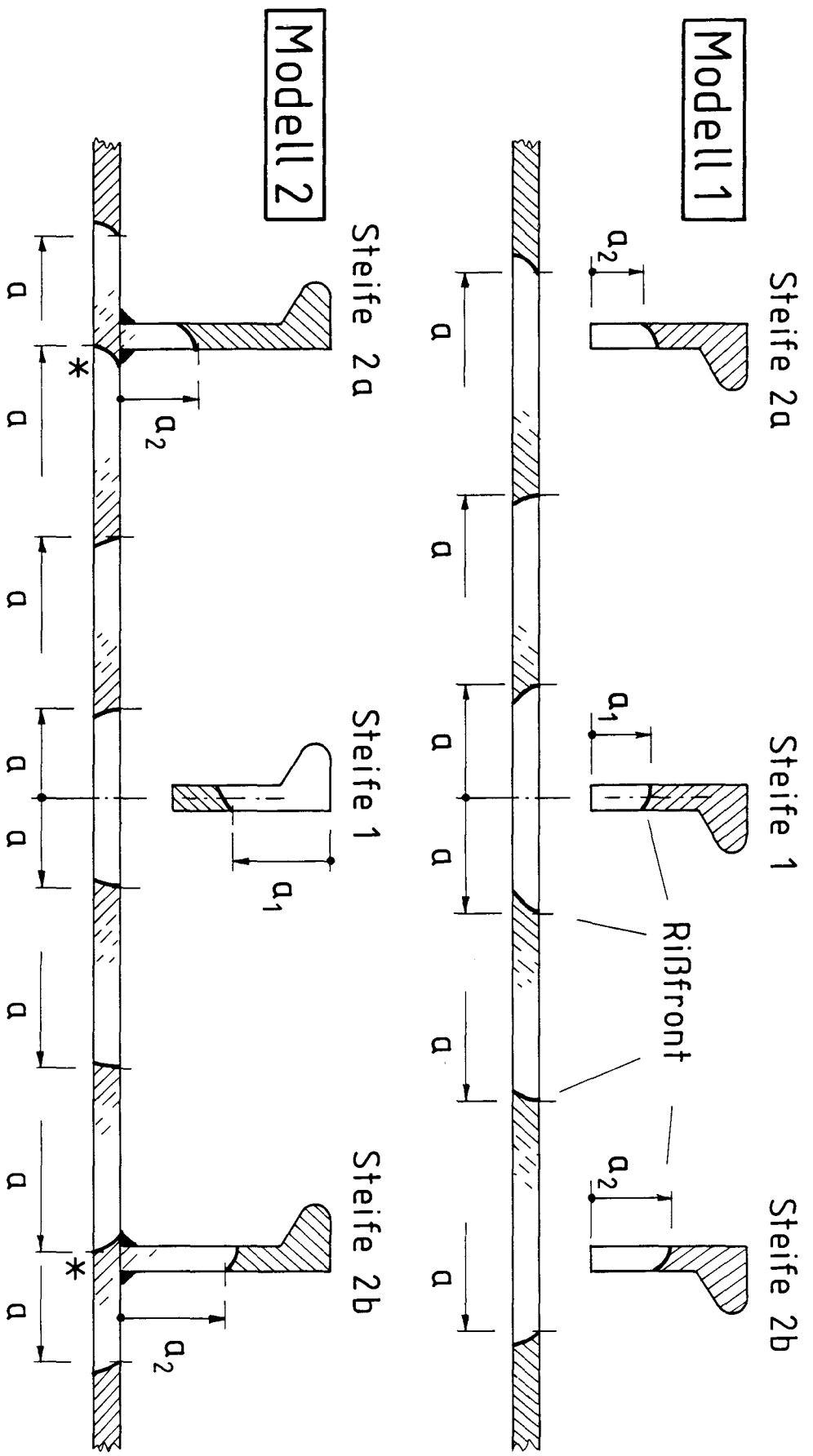


Riss in der Steife  
(v. o. gesehen)



Riss in der Platte

Bild 15 : Rißverlauf im Modell 2



**\*)** RiBlänge  $a$  im Bereich 20 mm vor und hinter Steife 2 bzgl. Unterkante Platte

Bild 16 : Definition der RiBlängen  $a$ ,  $a_1$  und  $a_2$

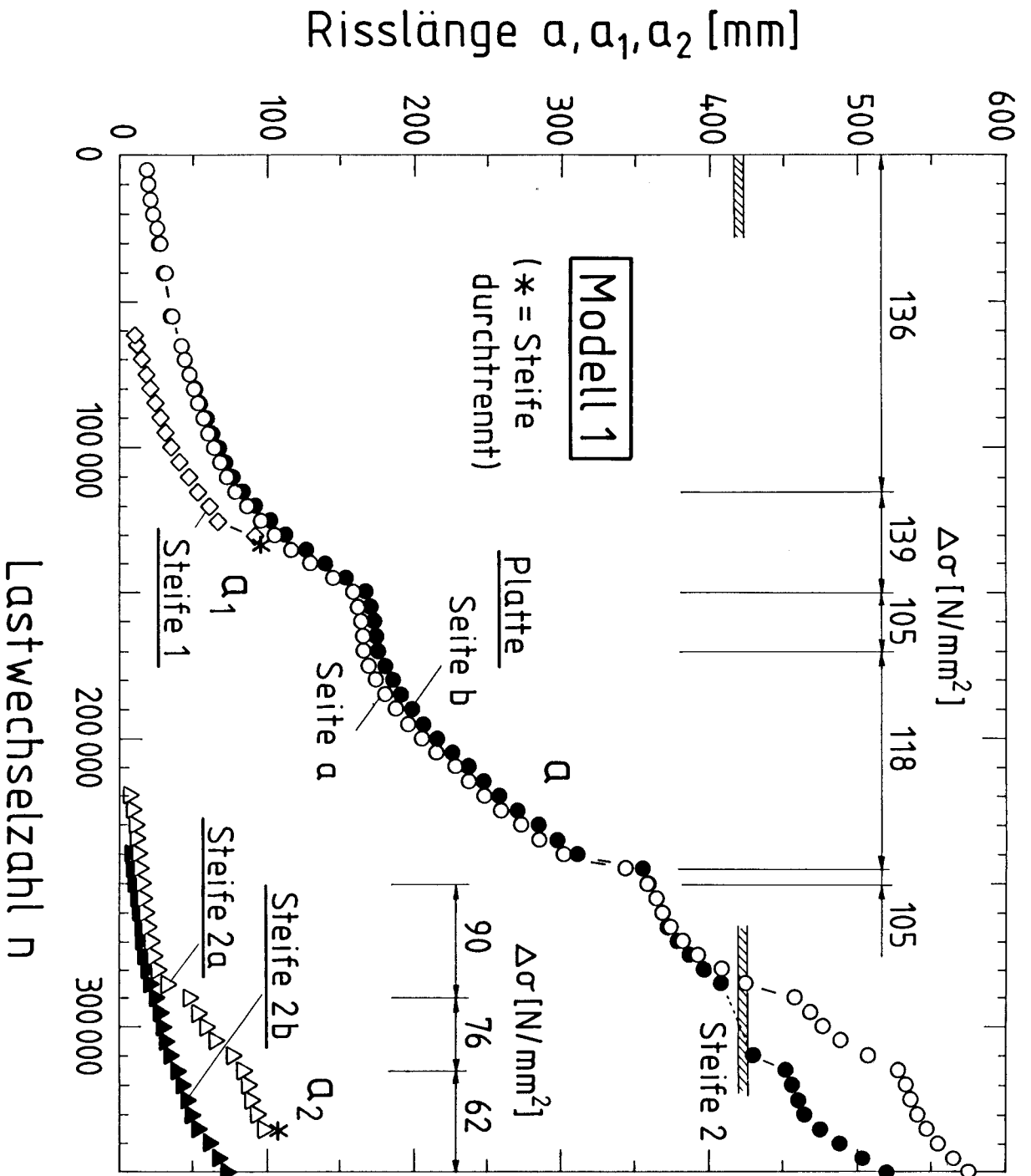


Bild 17 : Gemessene Risslängen beim Modell 1

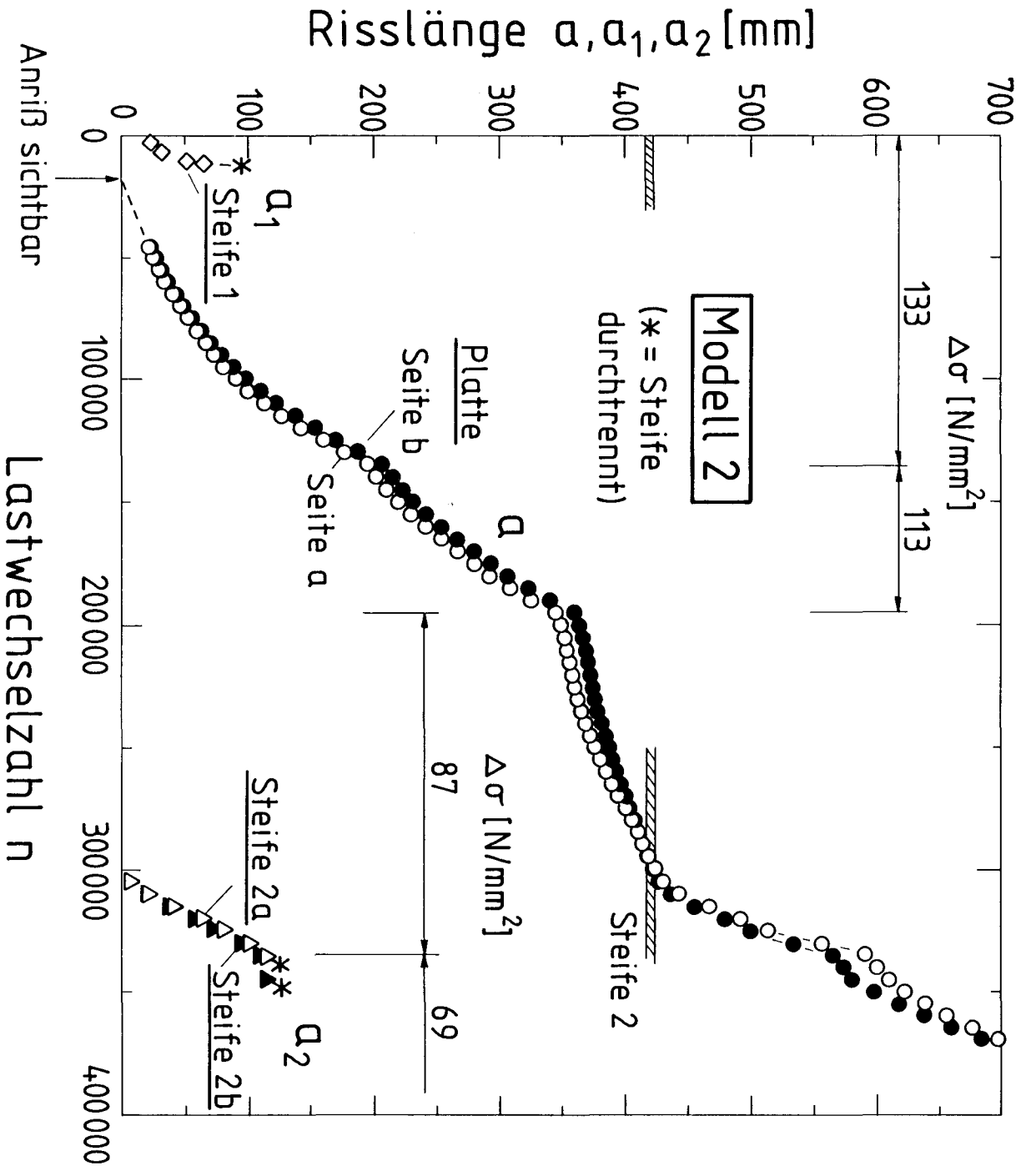


Bild 18 : Gemessene Rißlängen beim Modell 2

Meßquerschnitt A-A:

Meßquerschnitt B-B:

**Modell 1**

(700 mm vor Mitte Modell)

(100 mm vor Mitte Modell)

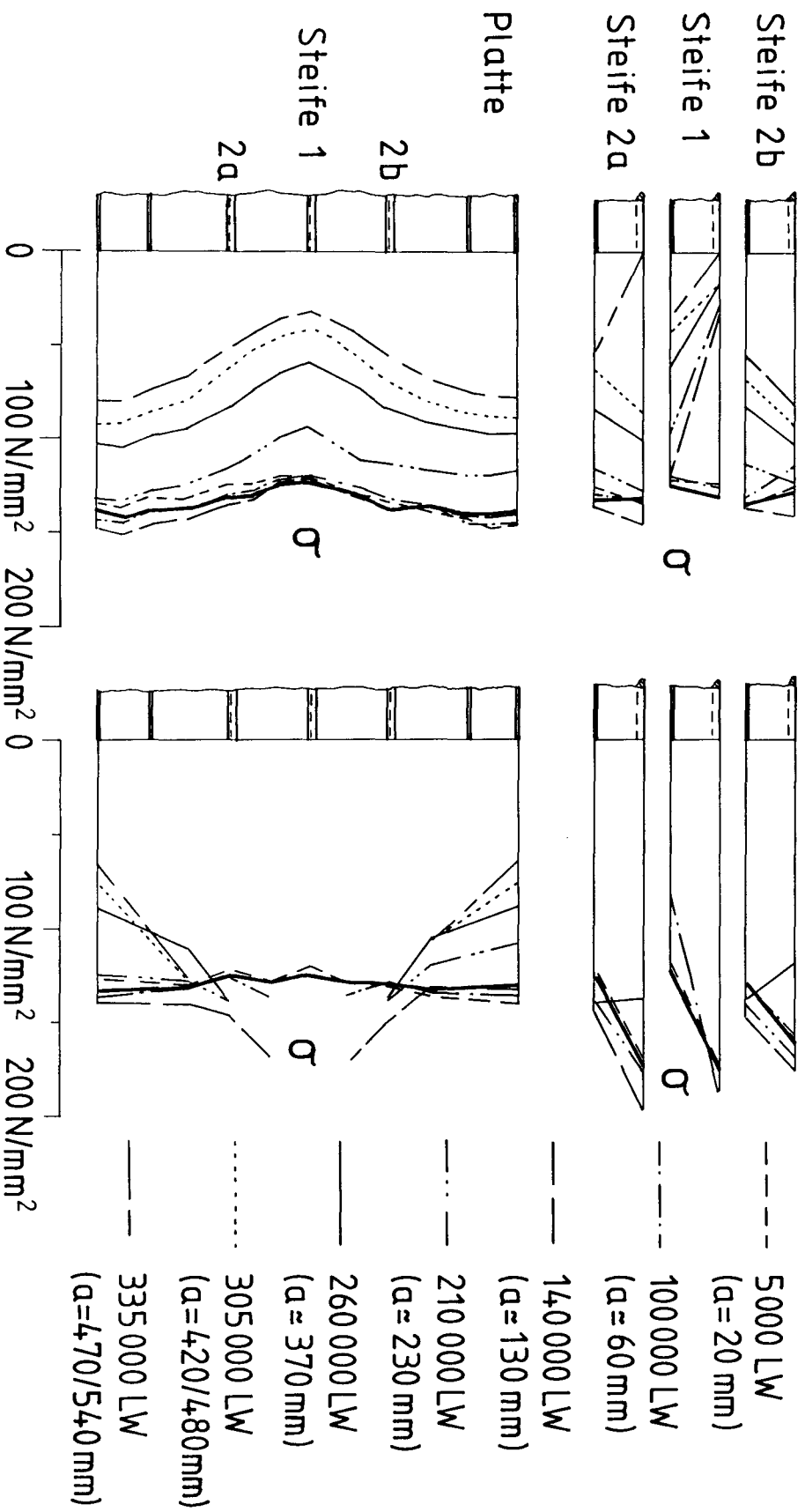


Bild 19 : Gemessener Spannungsverlauf im Modell 1

Meßquerschnitt A-A:

Meßquerschnitt B-B:

**Modell 2**

(700 mm vor Mitte Modell)

(100 mm vor Mitte Modell)

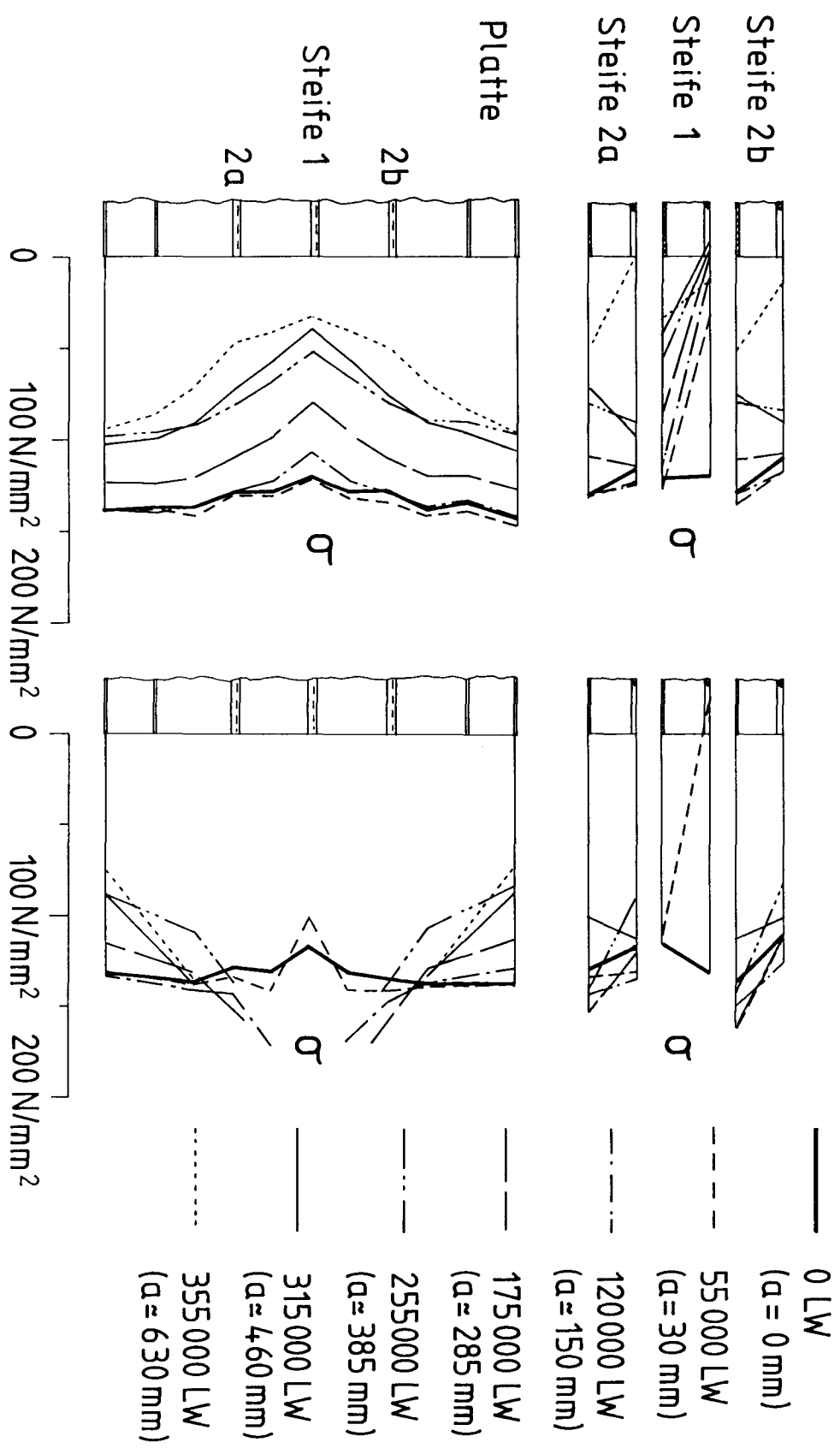


Bild 20 :

Gemessener Spannungsverlauf im Modell 2

# Modell 1

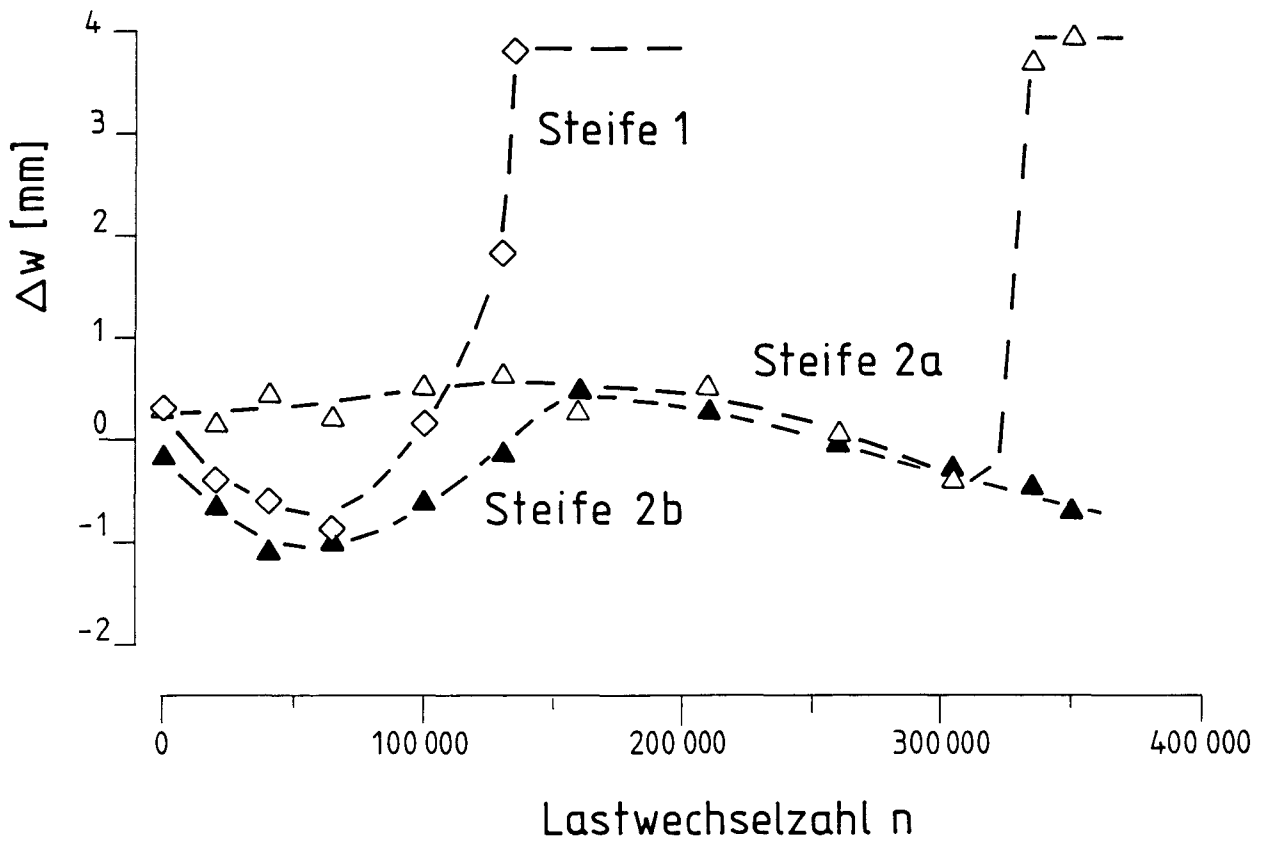
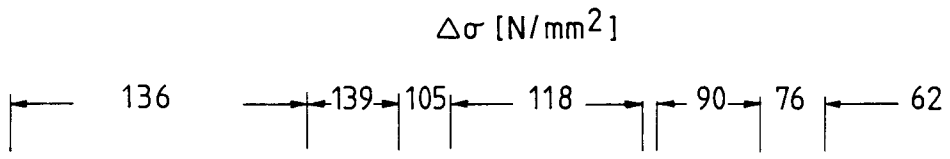
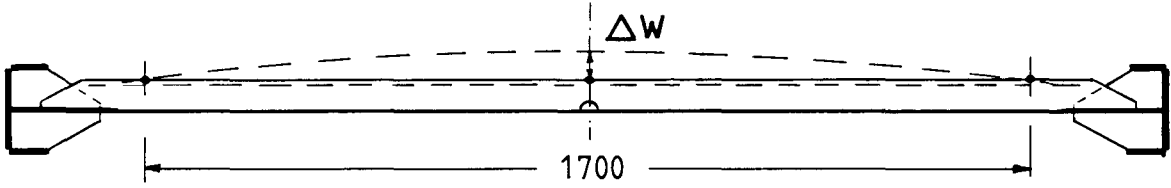


Bild 21 : Gemessene Lastverformungen beim Modell 1

# Modell 2

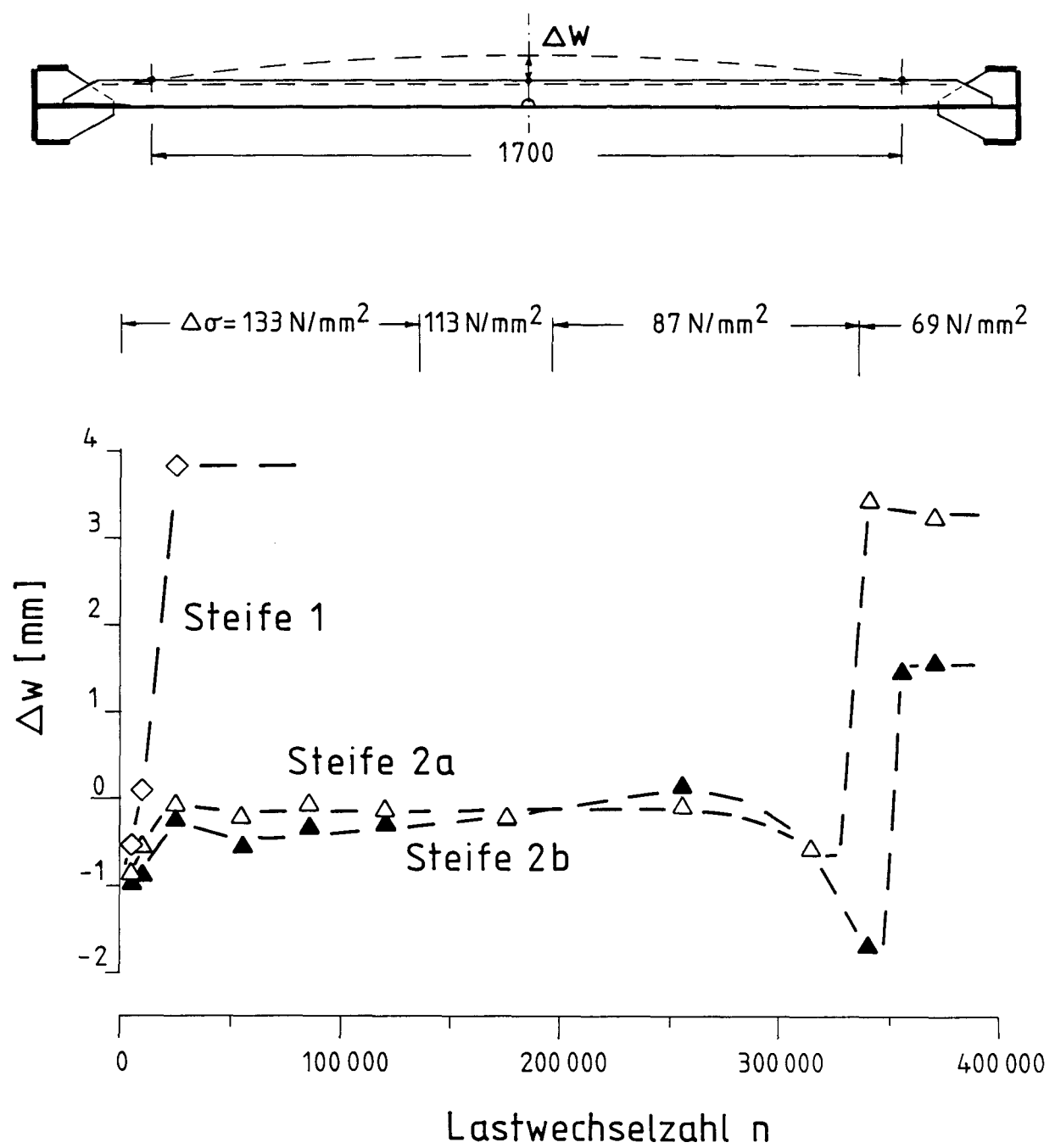
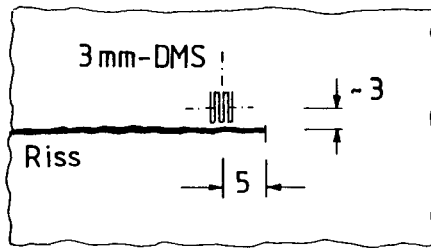


Bild 22 : Gemessene Lastverformungen beim Modell 2



**Modell 2**  
175 000 LW

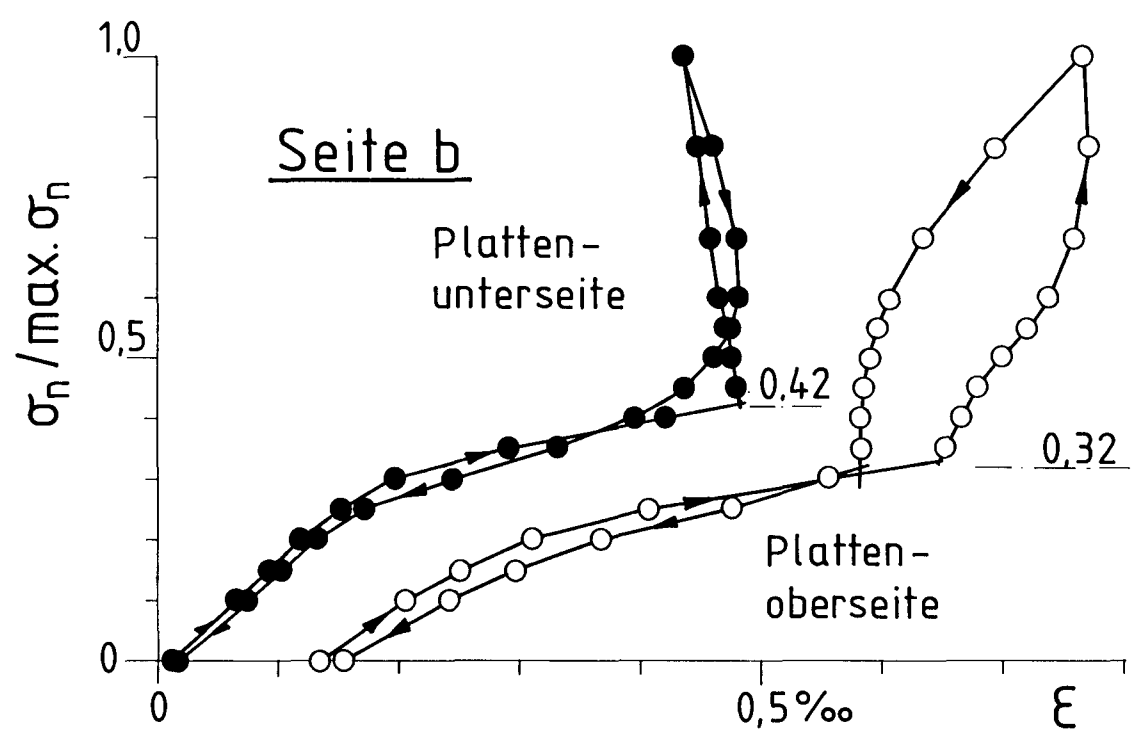
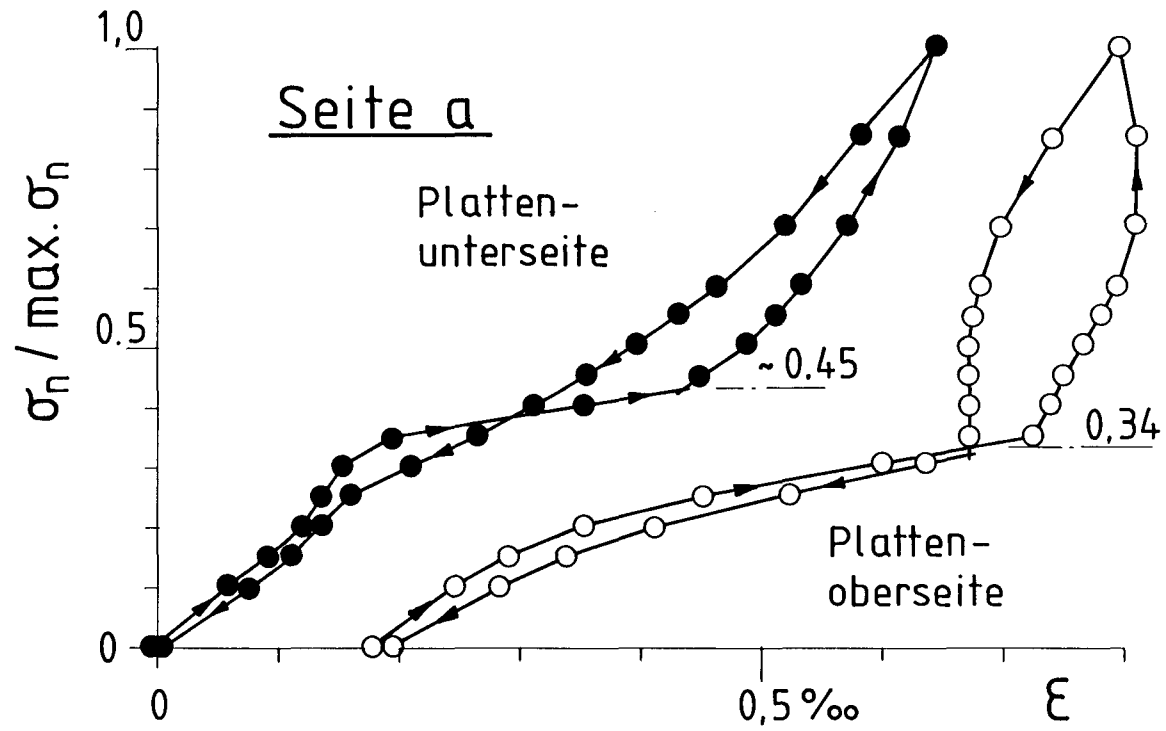


Bild 23 : Untersuchungen zum Rischlieen

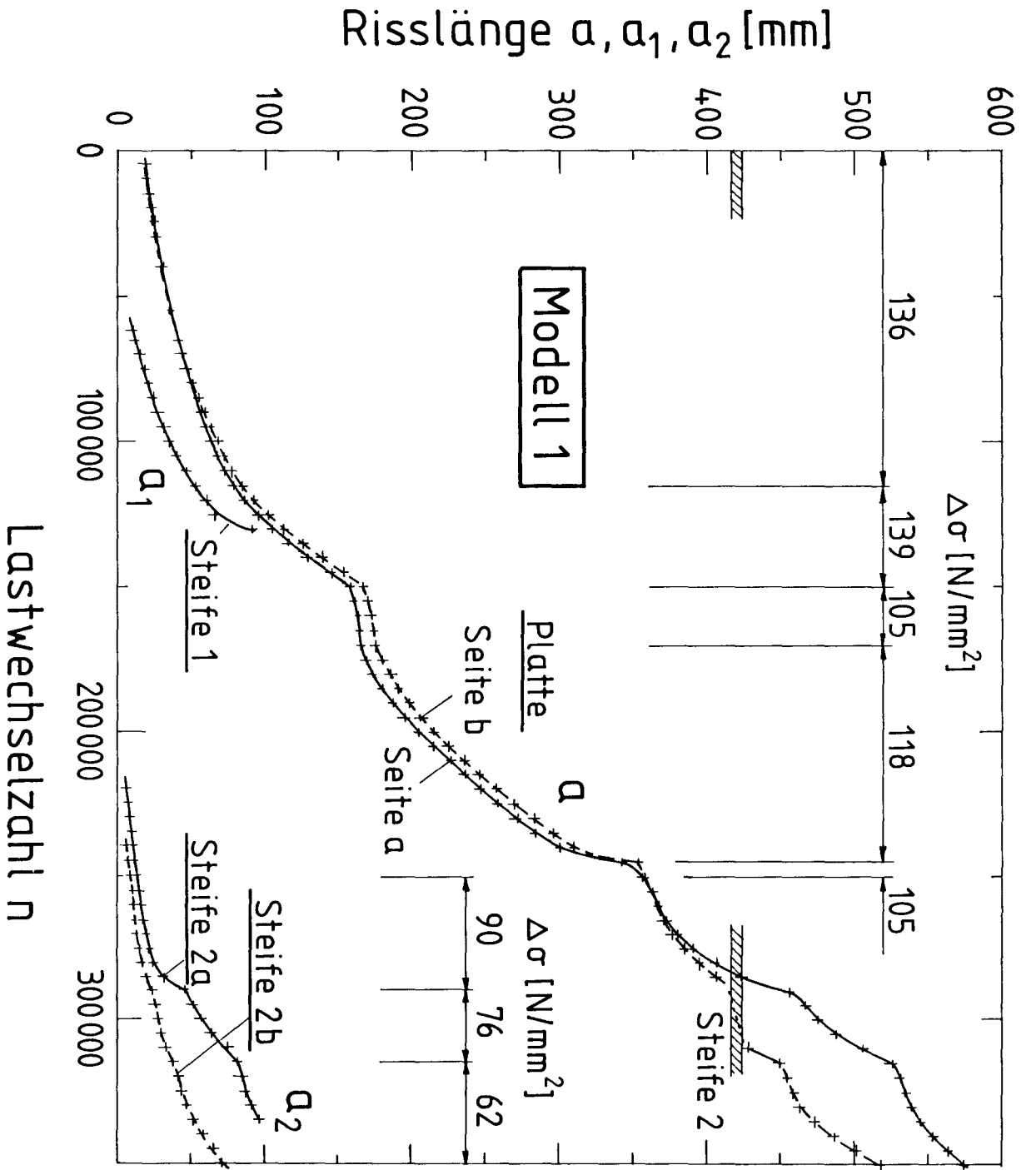


Bild 24 : Ausgleichskurven für die Risblängen beim Modell 1

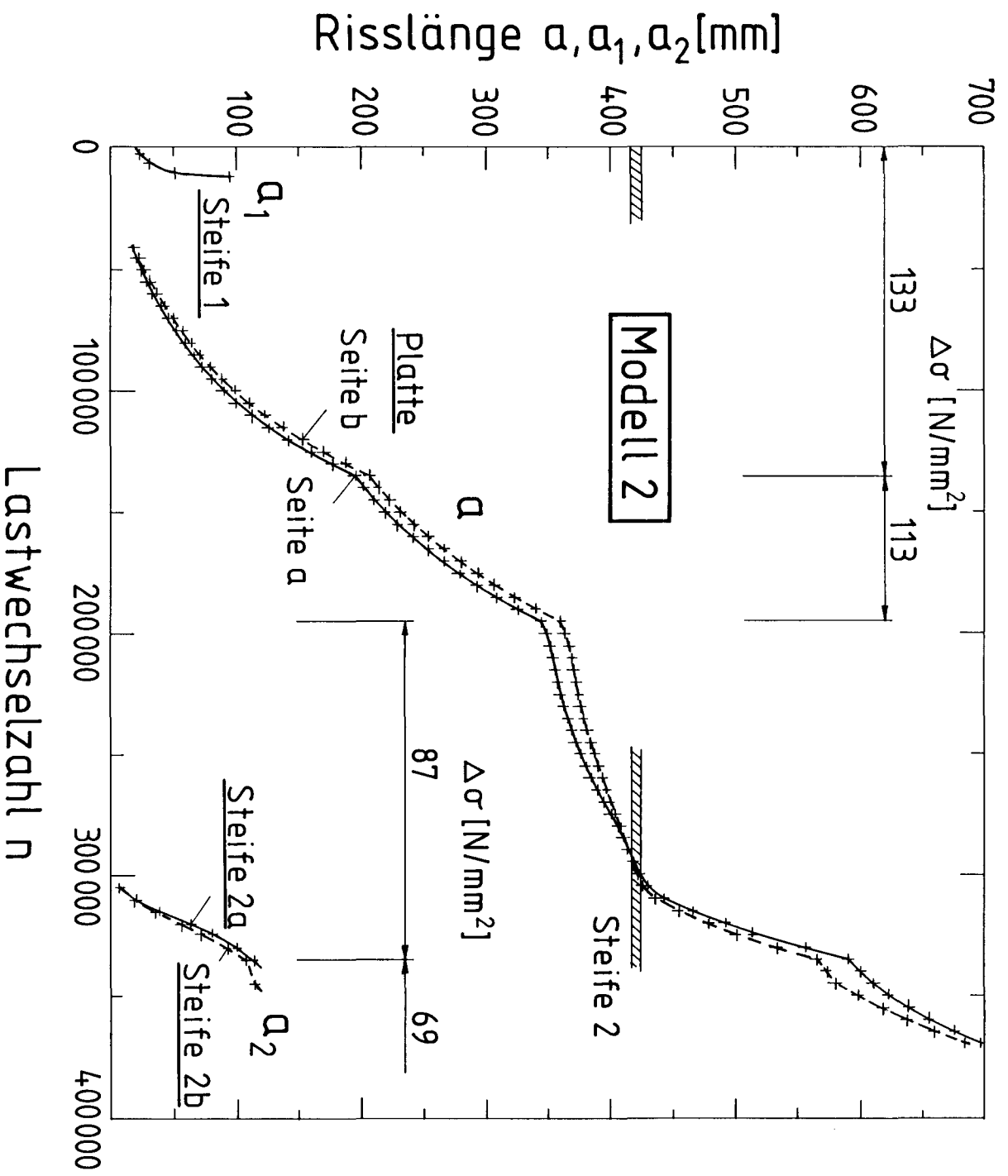


Bild 25 : Ausgleichskurven für die Riblängen beim Modell 2

# Modell 1

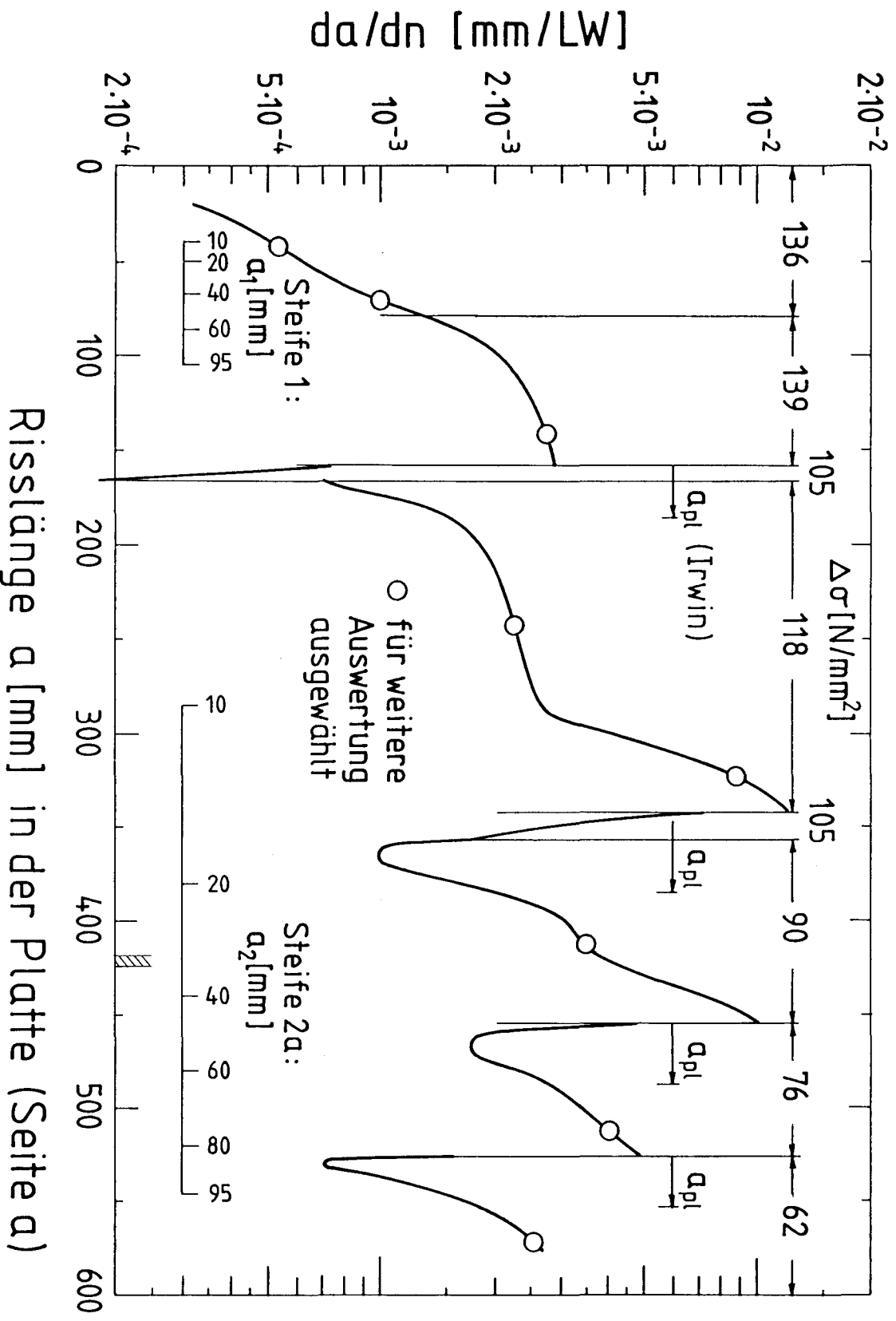


Bild 26 : Ribfortschrittsgeschwindigkeit  $da/dn$  in der Platte des Modells 1 (Seite a)

# Modell 1

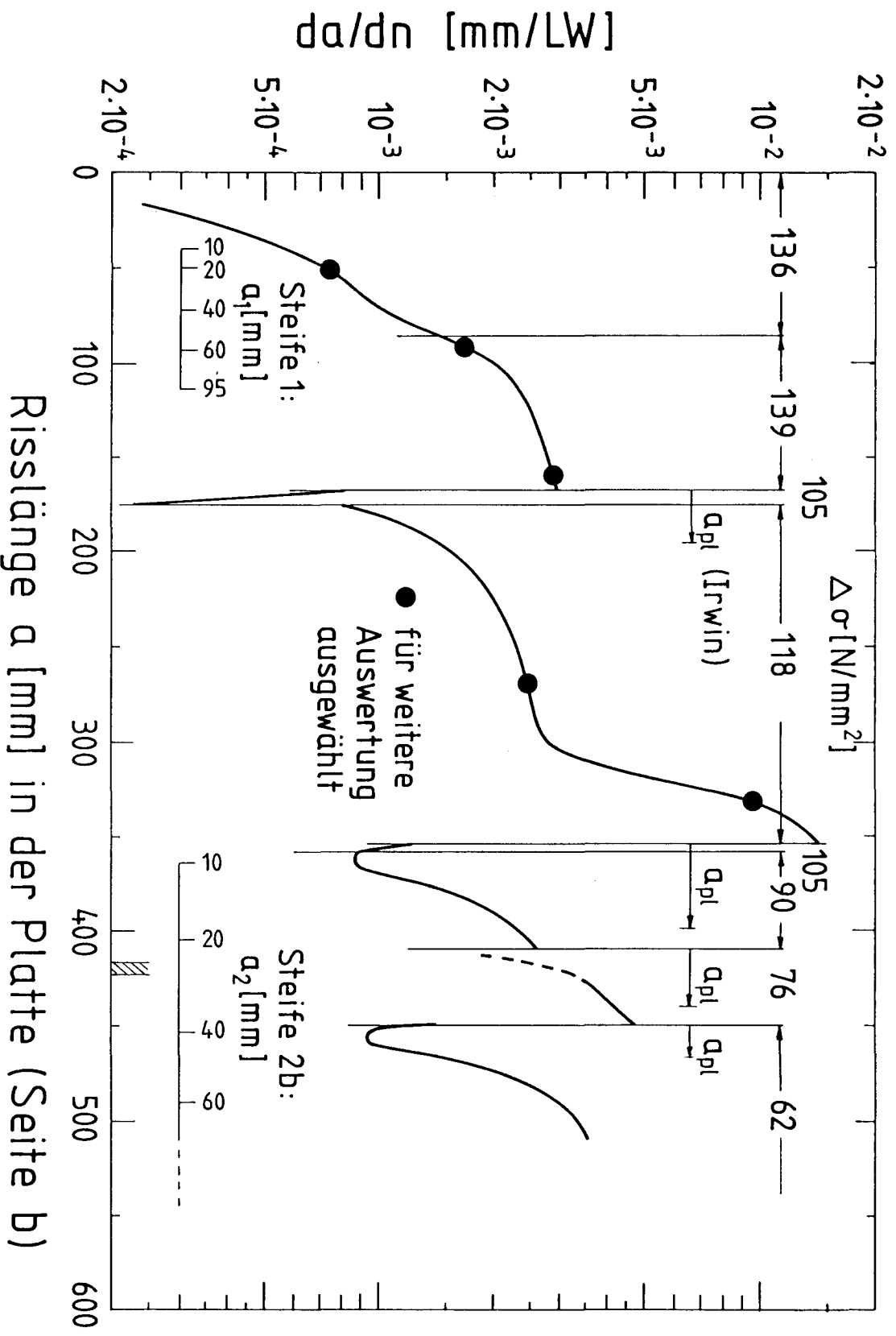
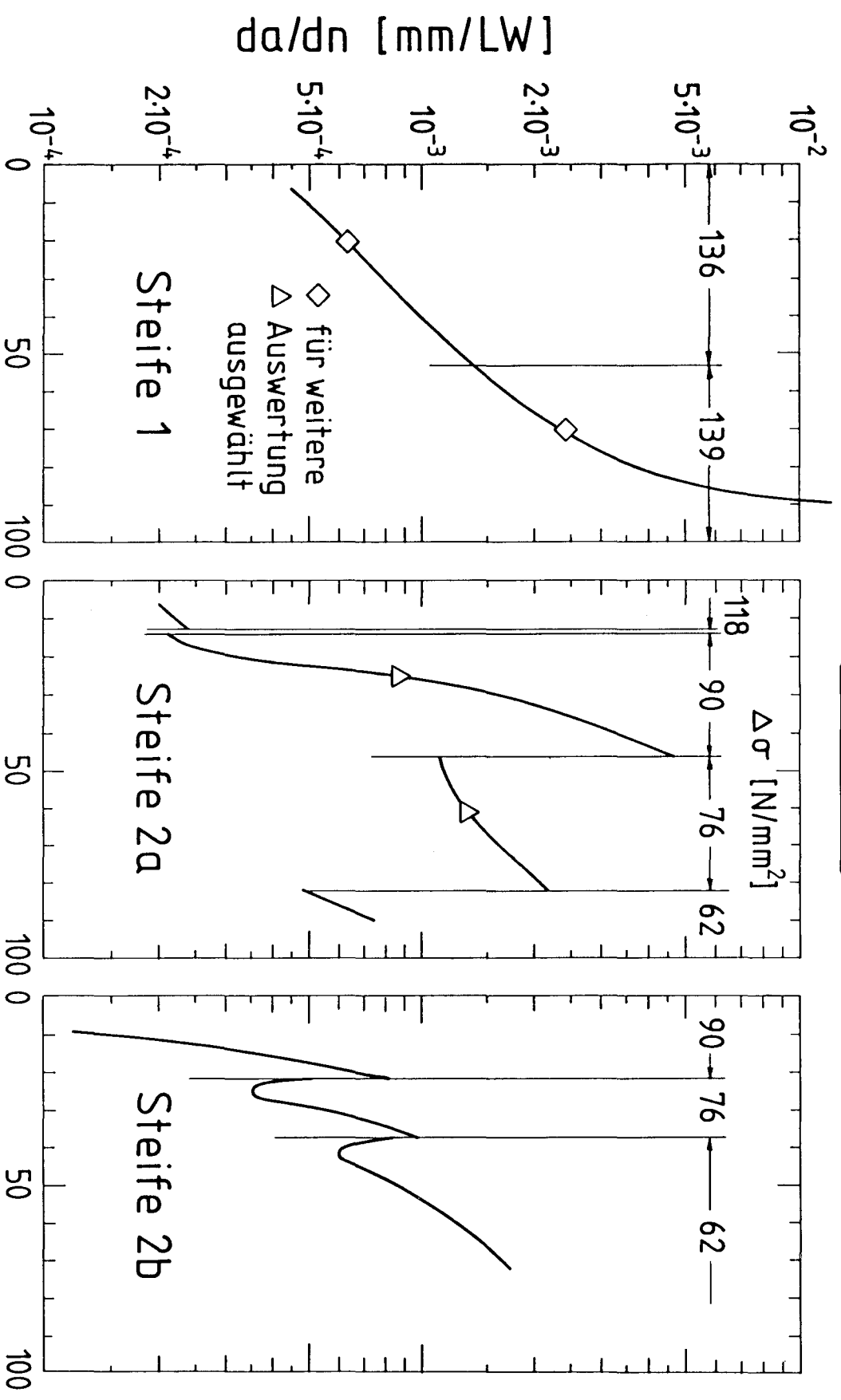


Bild 27 : Ribfortschrittschwindigkeit  $da/dn$  in der Platte des Modells 1 (Seite b)

**Modell 1**



Risslänge  $a_{1/2}$  [mm] in der Steife

Bild 28 : Ribfortschrittsgeschwindigkeit  $da/dn$  in den Steifen des Modells 1

# Modell 2

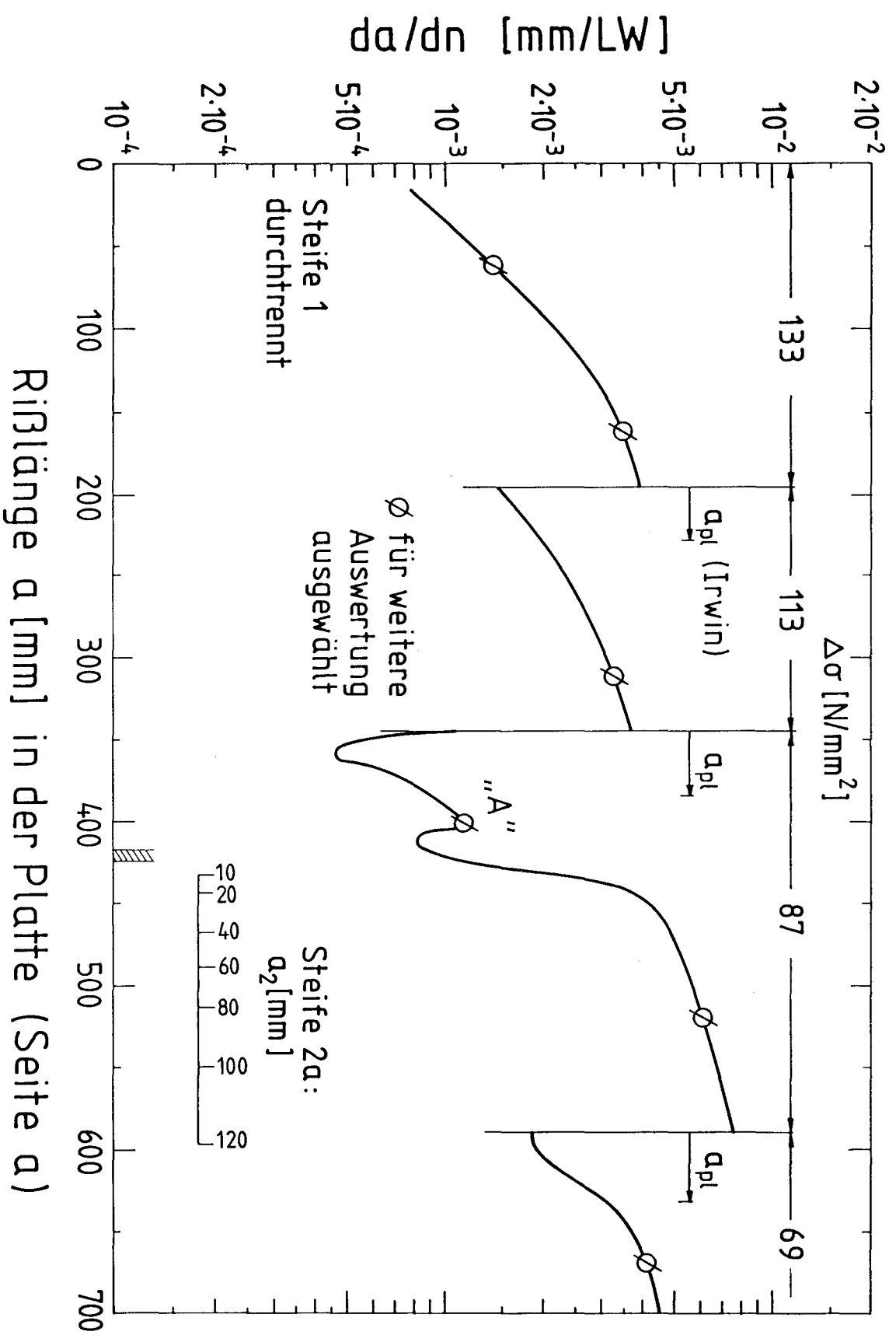
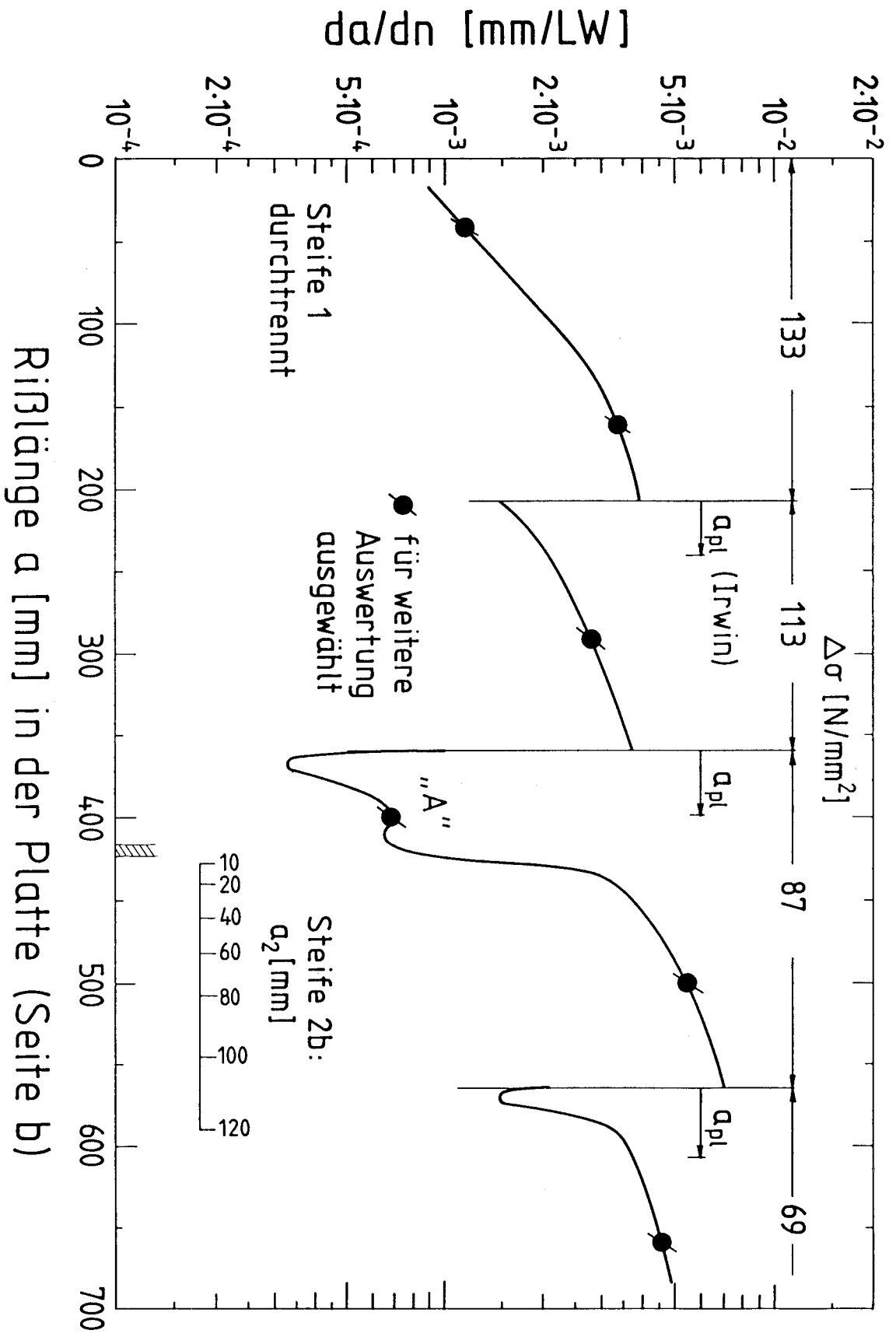


Bild 29 : Ribfortschrittsgeschwindigkeit  $da/dn$  in der Platte des Modells 2 (Seite a)

# Modell 2

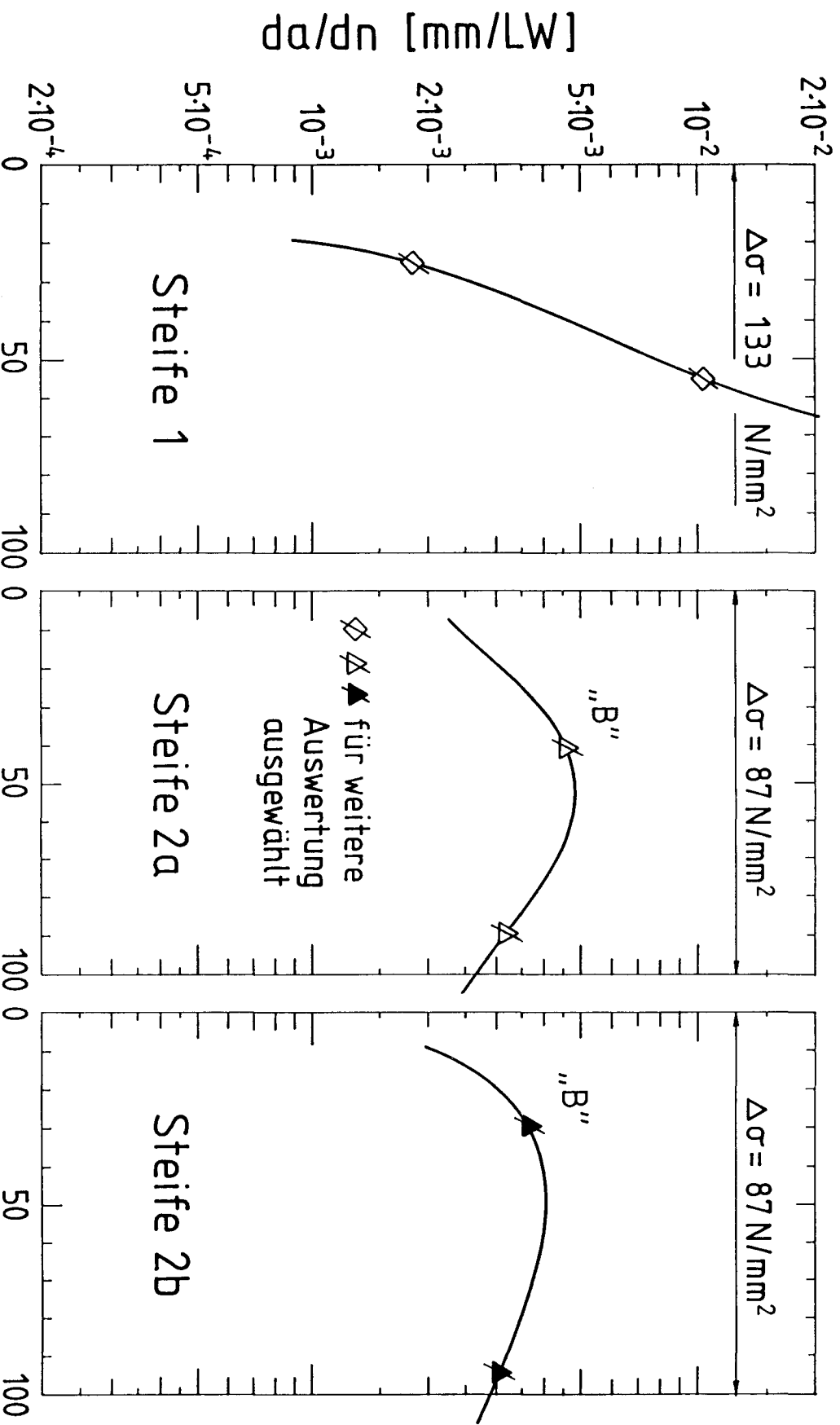


Rißlänge  $a$  [mm] in der Platte (Seite b)

Bild 30 :

Rißfortschrittsgeschwindigkeit  $da/dn$  in der Platte des Modells 2 (Seite b)

## Modell 2



Risslänge  $a_{1/2}$  [mm] in der Steife

Bild 31 :

Rißfortschrittsgeschwindigkeit  $da/dn$  in den Steifen des Modells 2

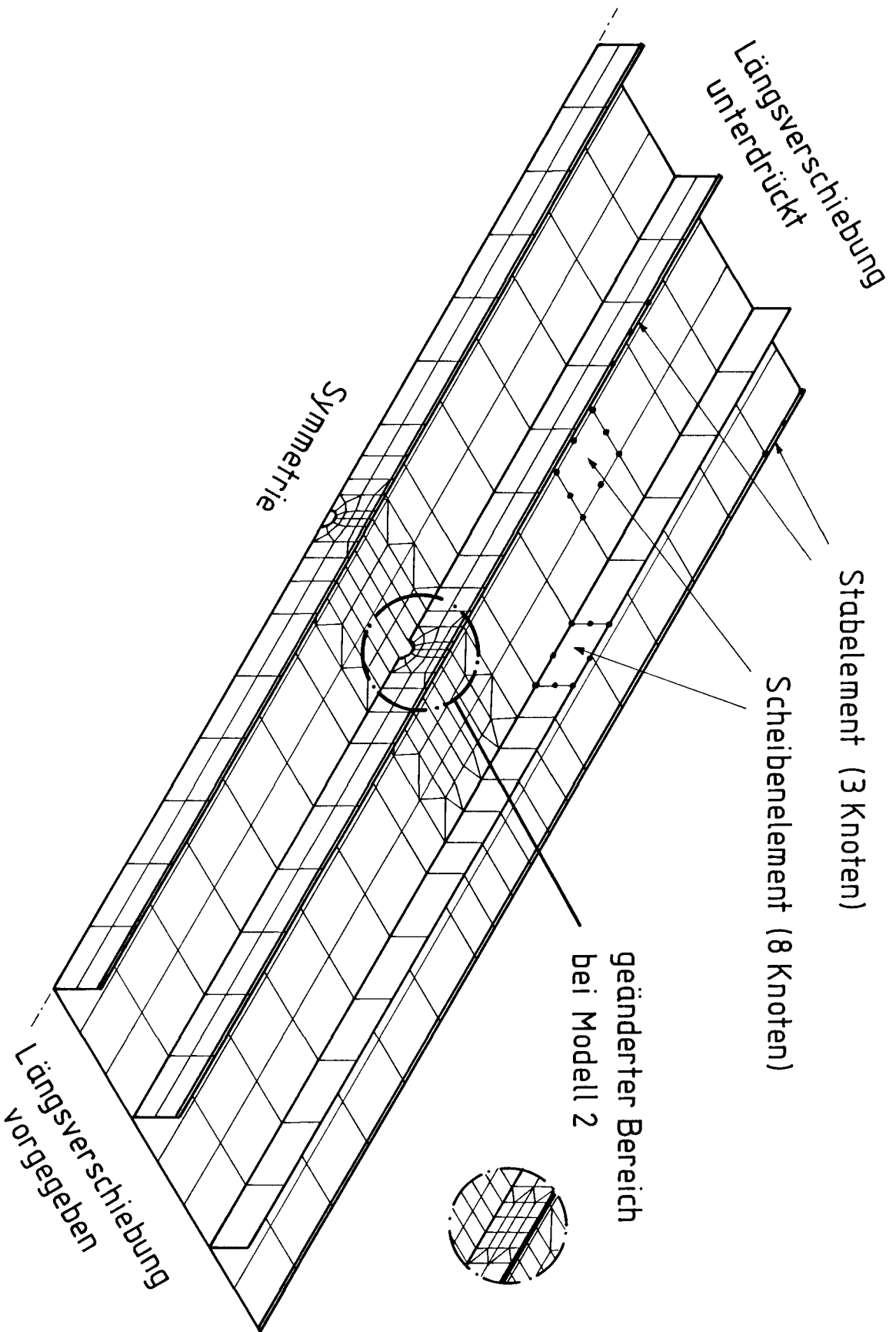
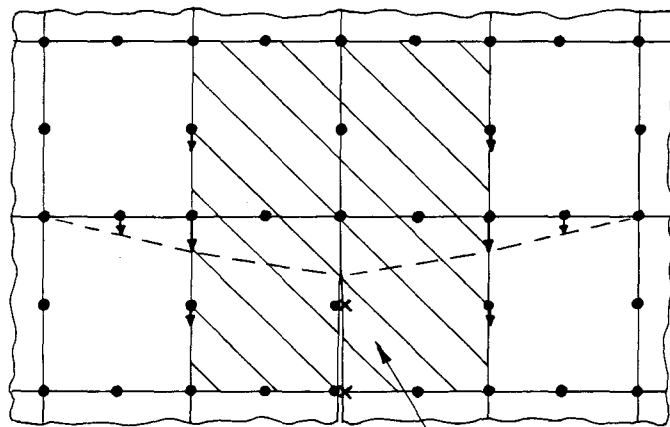
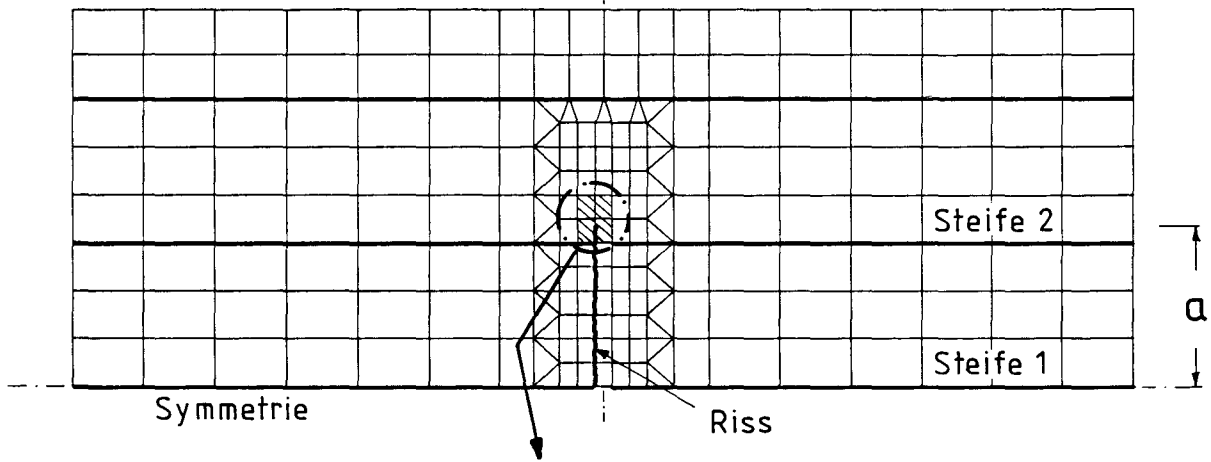


Bild 32 : Finite - Element - Netz für die Berechnung der Spannungsintensitätsfaktoren

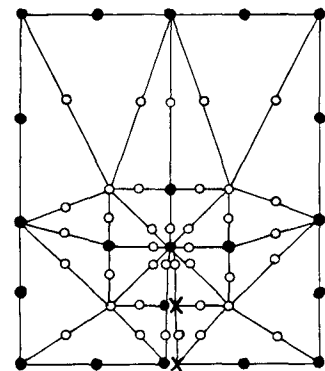
Steife 1 und 2:



Platte:



- Vorhandene Knoten (z.T. verschoben)
- × Neue Rißuferknoten
- Neue Knoten zur Netzverfeinerung



ausgetauschte Elemente

Bild 33 : Bildung der Rißufer und Netzverfeinerung an der Rißspitze

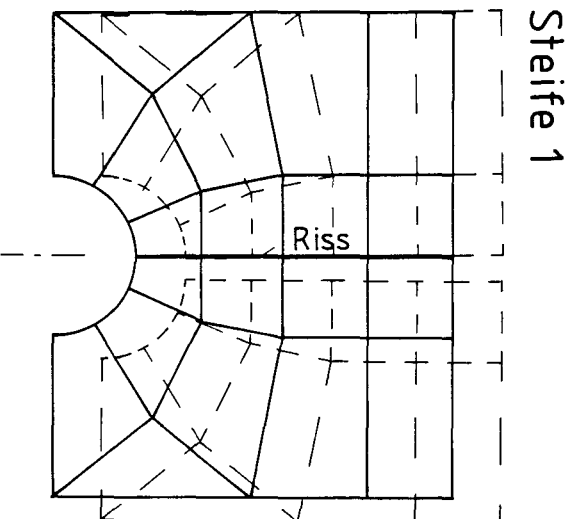
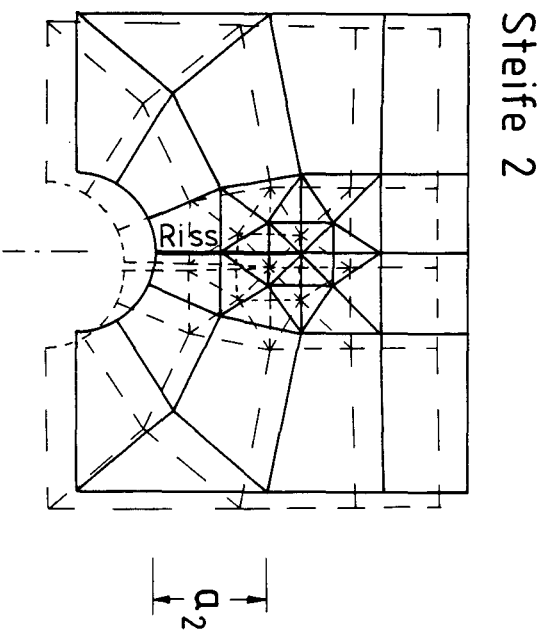
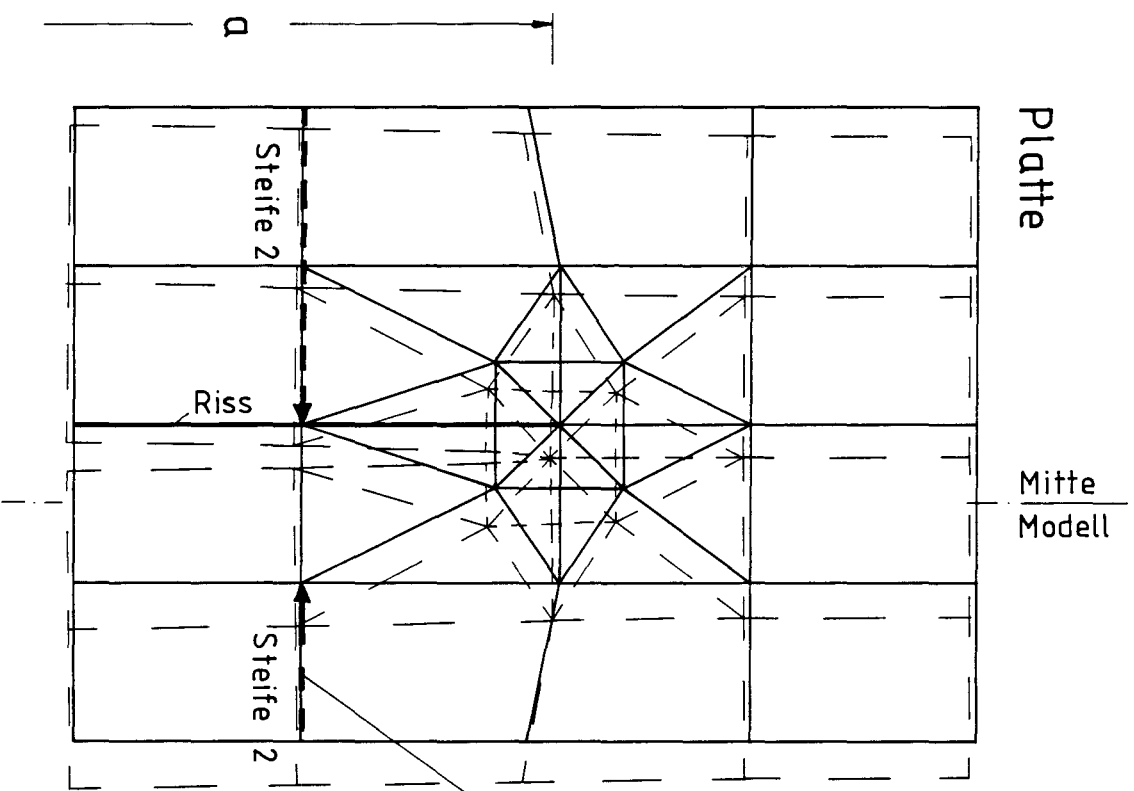


Bild 34 : Verformungen im Ribbereich (mit verschiedenen Maßstabfaktoren)

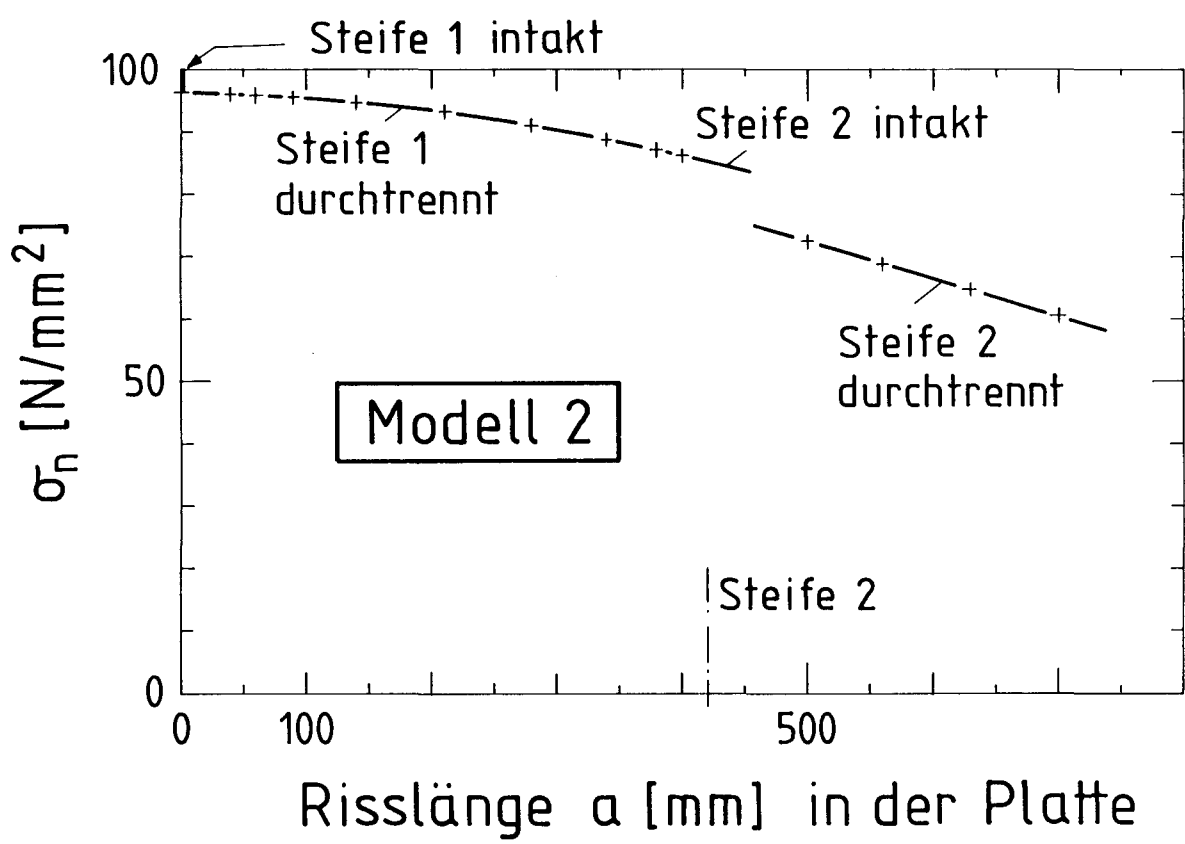
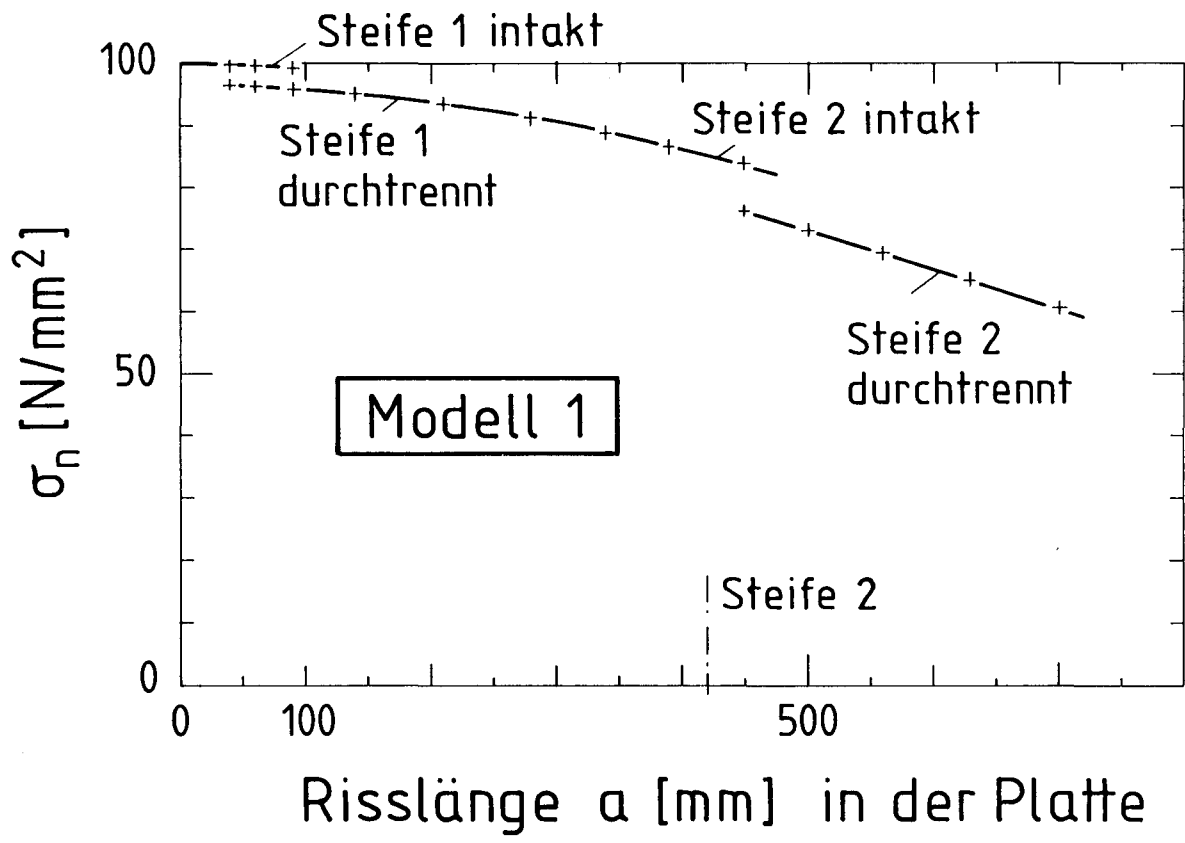


Bild 35 : Veränderung der Nennspannung  $\sigma_n$  mit zunehmender Rißlänge bei konstanter Randverschiebung des Modells

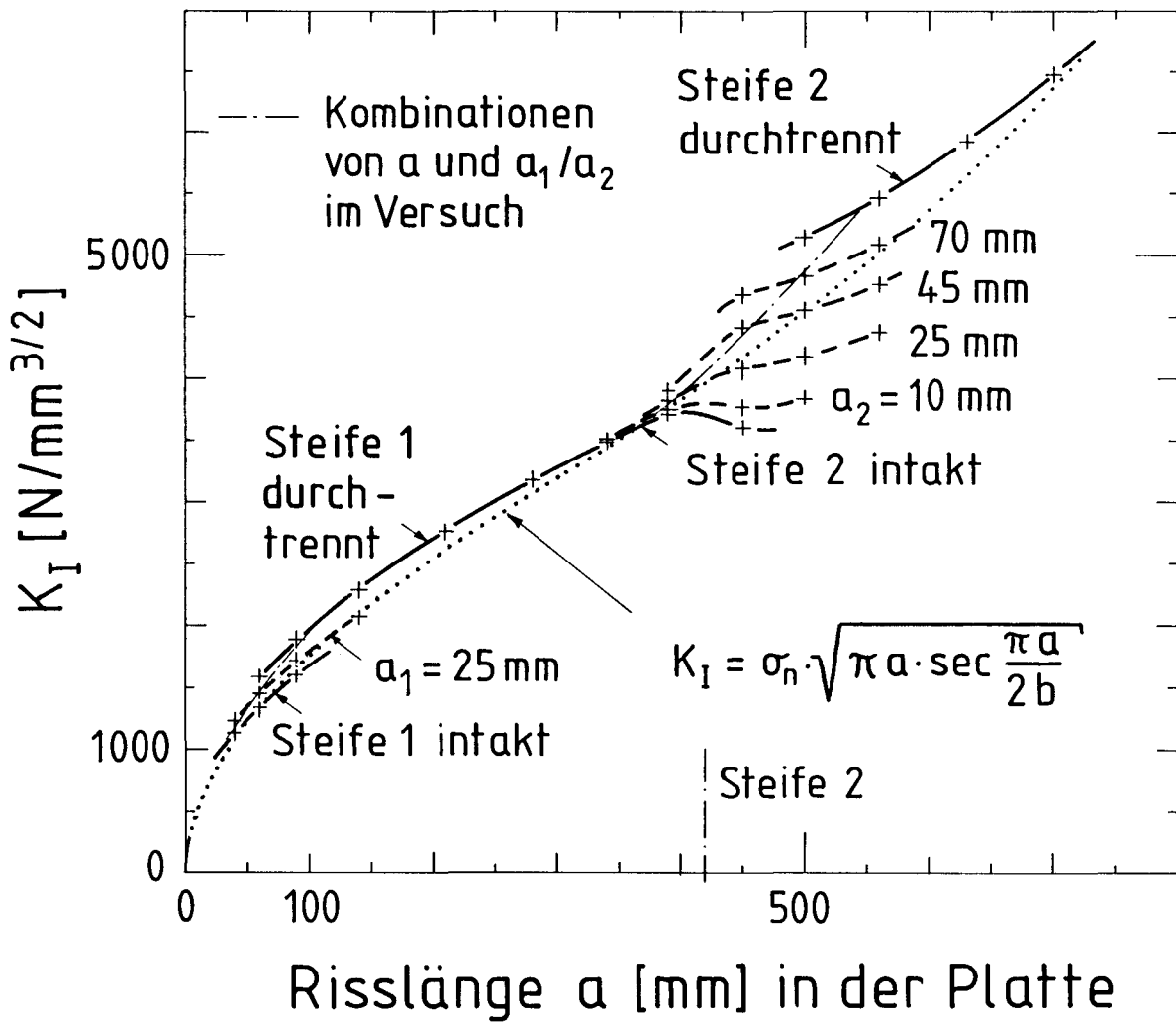
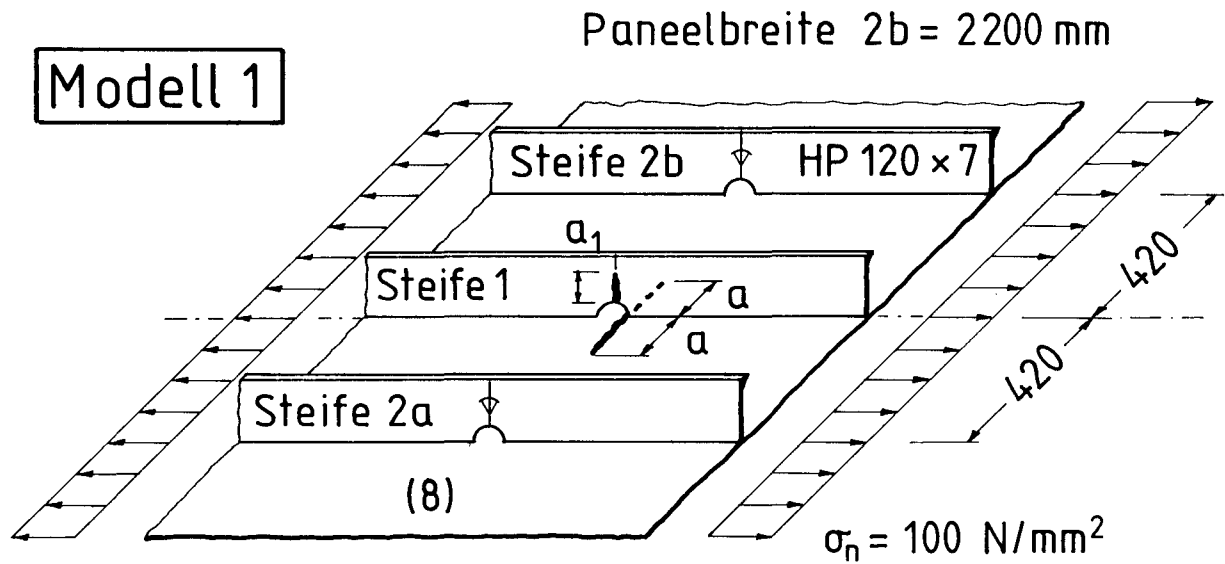


Bild 36 : Berechneter Spannungsintensitätsfaktor  $K_I$  für die Platte des Modells 1

# Modell 1

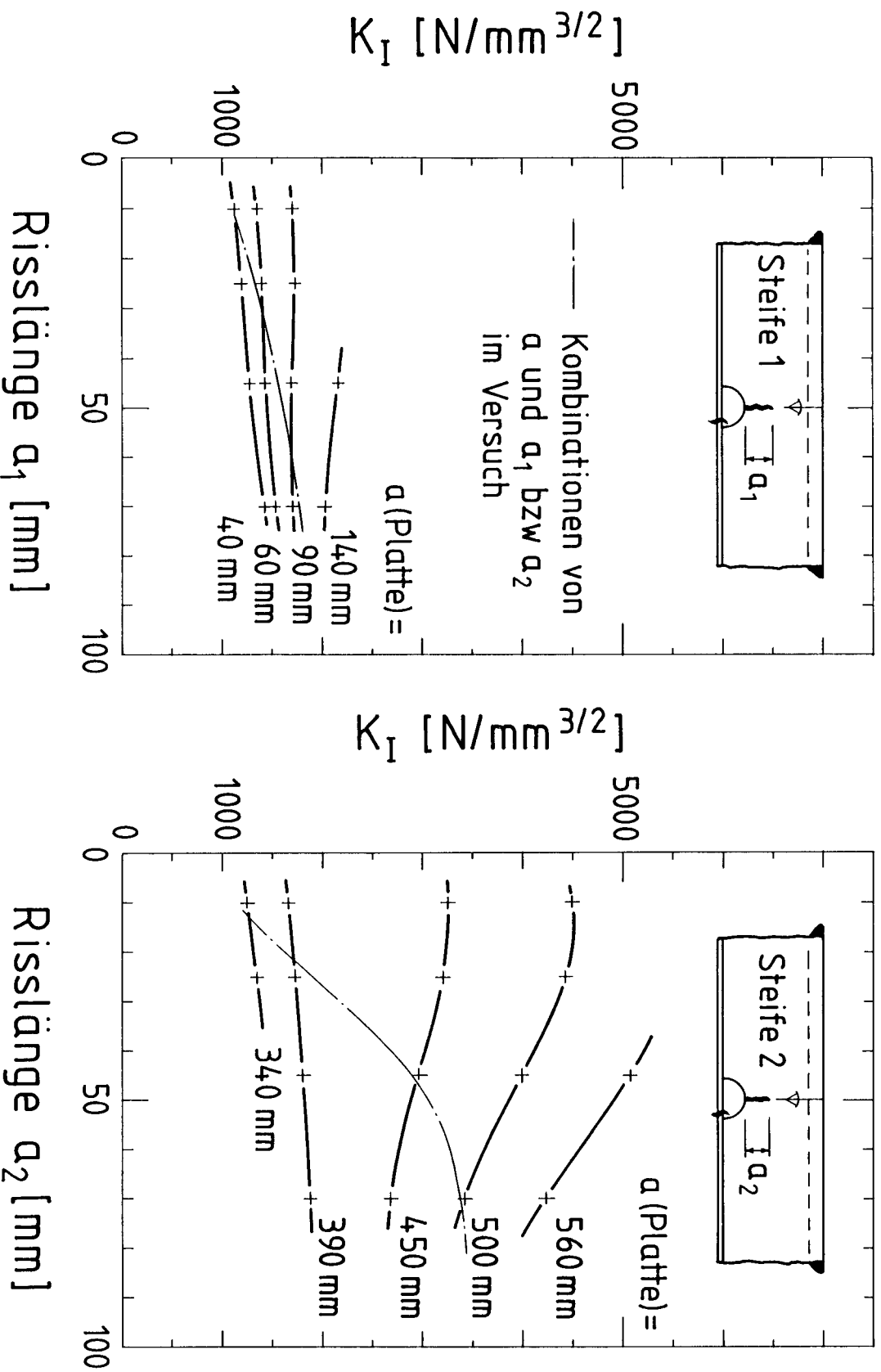


Bild 37 : Berechneter Spannungsintensitätsfaktor  $K_I$  für die Steifen des Modells 1

**Modell 2**

Paneelbreite  $2b = 2200 \text{ mm}$

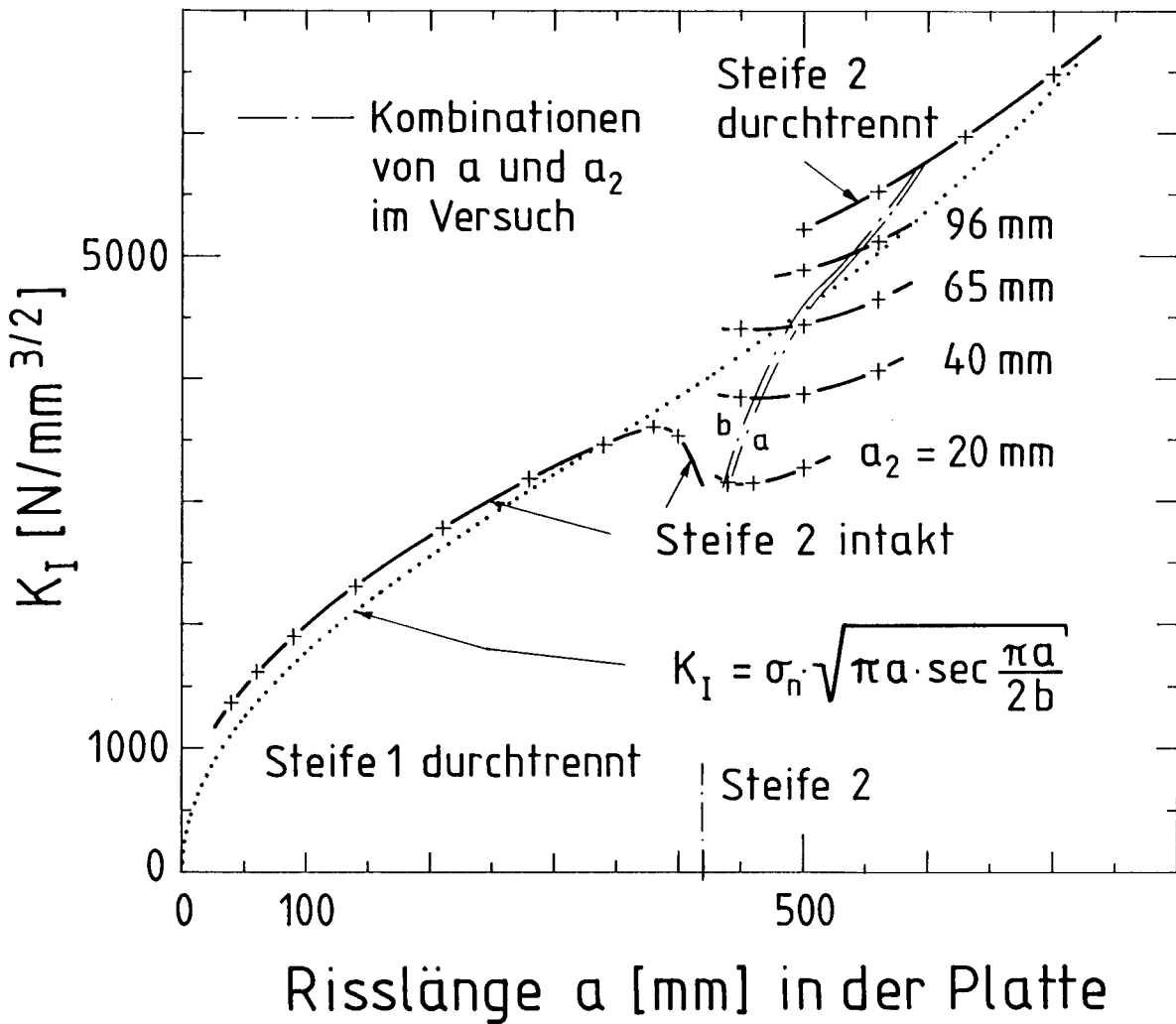
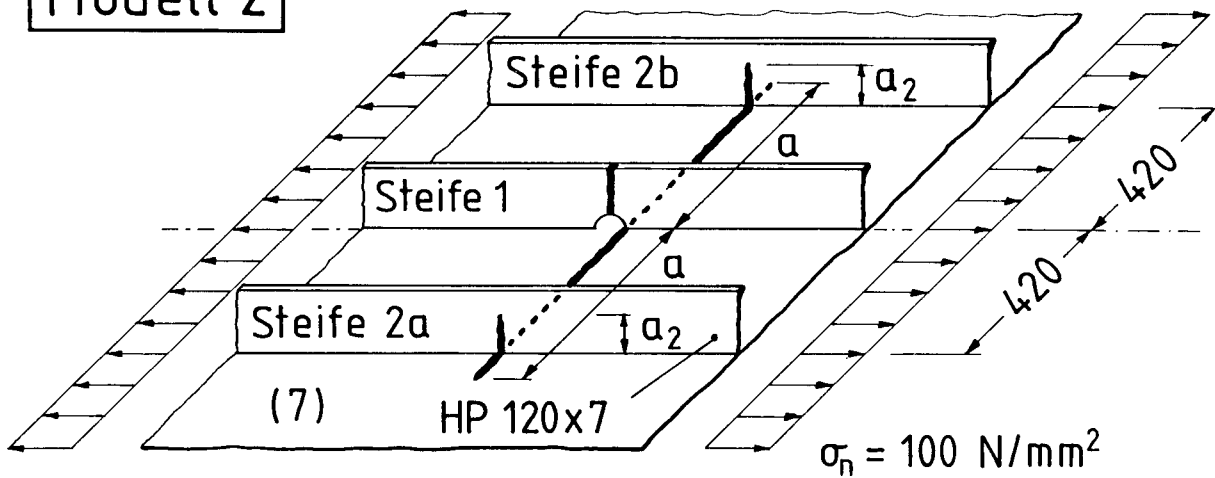


Bild 38 : Berechneter Spannungsintensitätsfaktor  $K_I$  für die Platte des Modells 2

# Modell 2

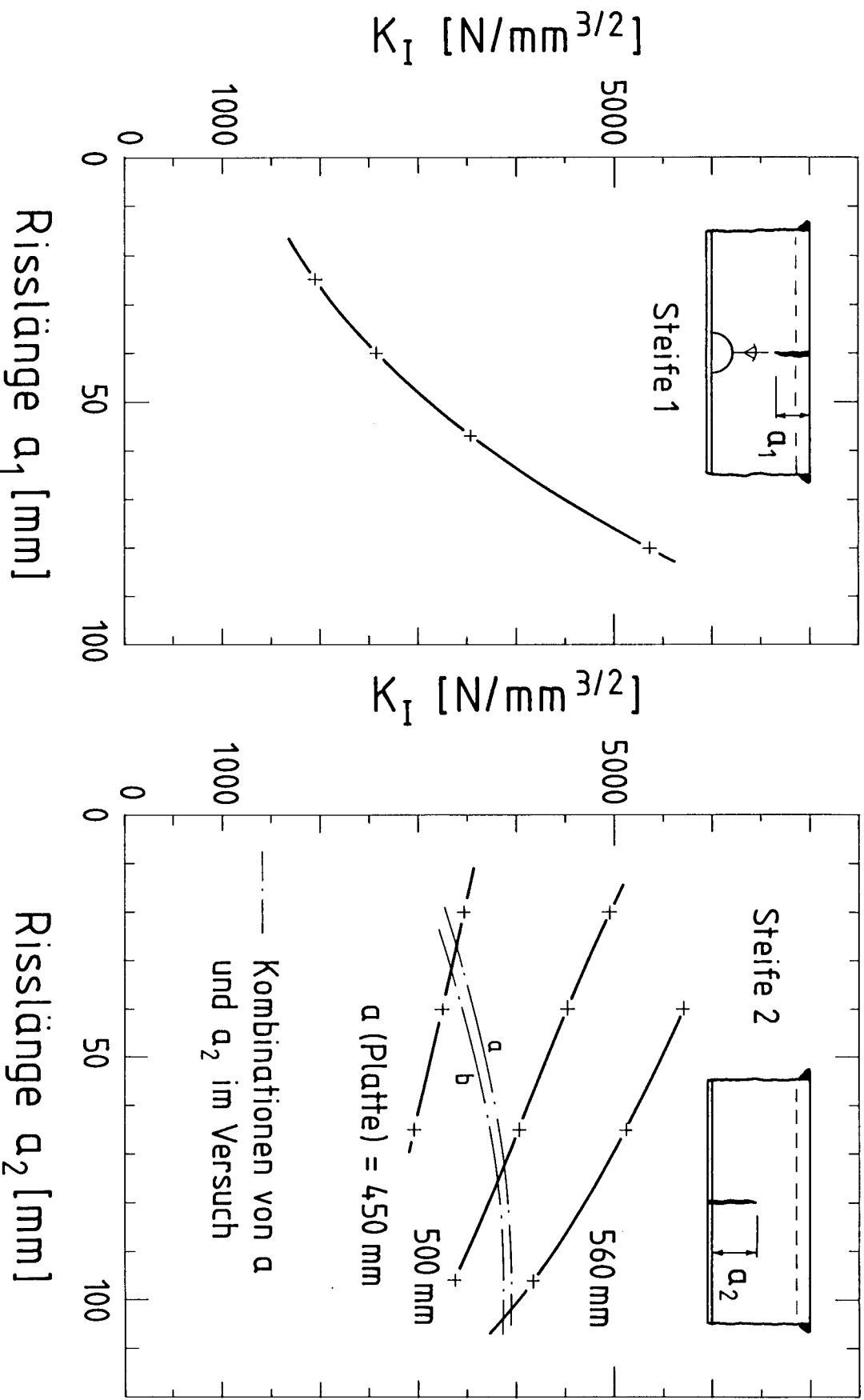
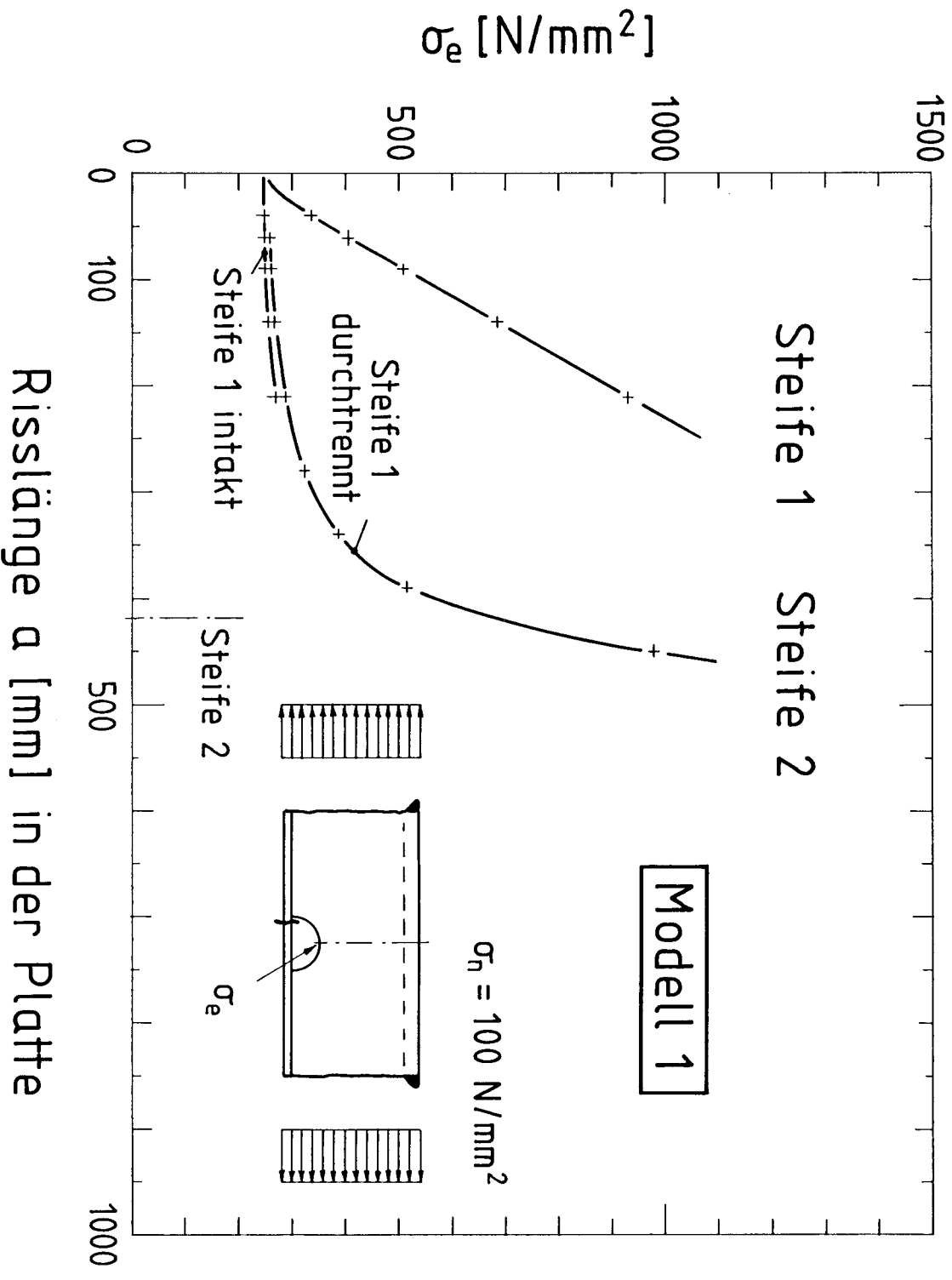


Bild 39 : Berechneter Spannungsintensitätsfaktor  $K_I$  für die Steifen des Modells 2



### Risslänge $a$ [mm] in der Platte

Bild 40 : Elastische Kerbspannung  $\sigma_e$  am Abschweißblock bei zunehmender Riblänge in der Platte

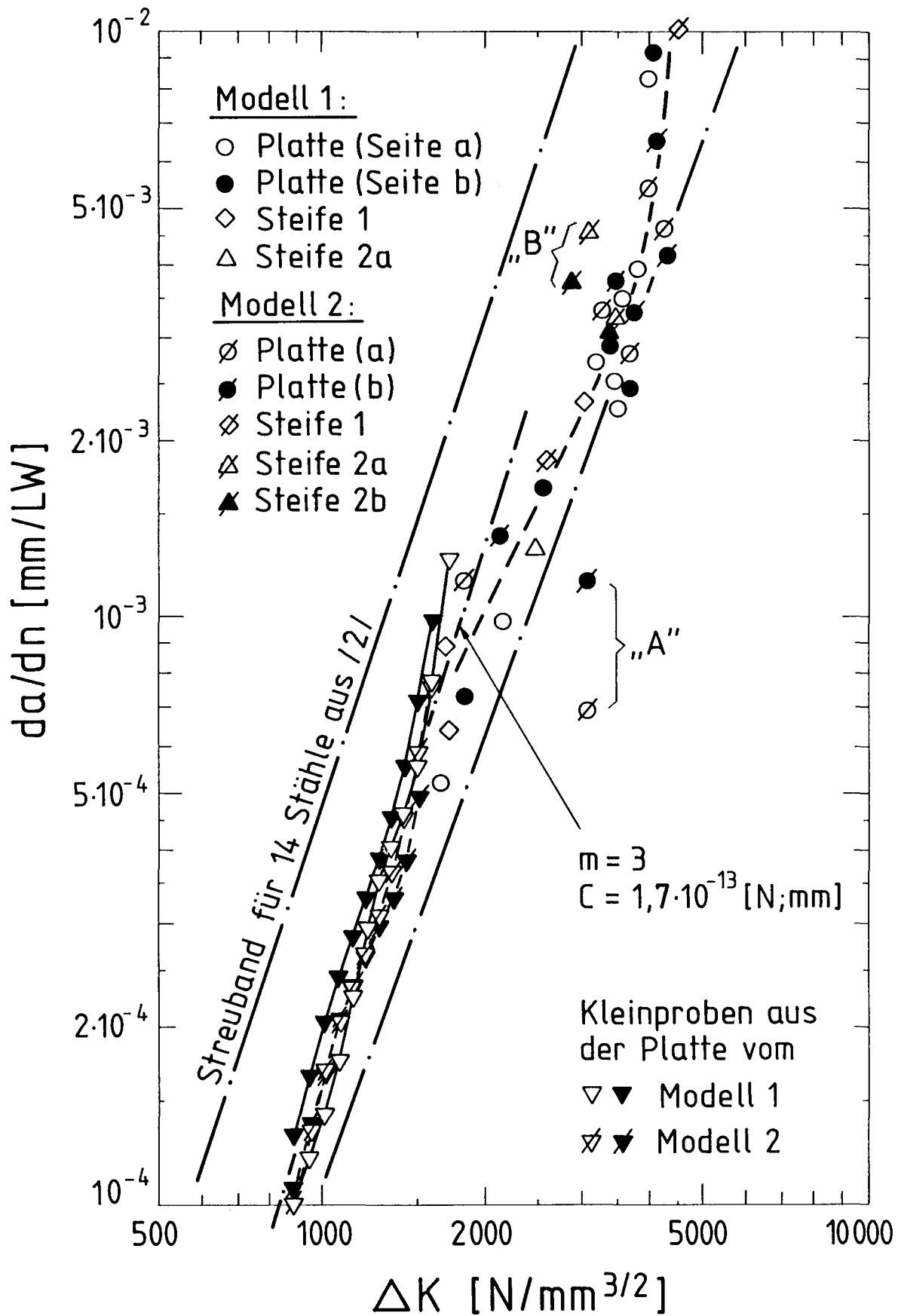


Bild 41 : Rißfortschrittsgeschwindigkeiten  $da/dn$  für die Modelle 1 und 2 sowie für die Kleinproben in Abhängigkeit von  $\Delta K$

$\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Last- wechsel- Zahl n	Rißlänge a, a <sub>1</sub> , a <sub>2</sub> [mm]				
		Platte Seite a	Platte Seite b	Steife 1	Steife 2a	Steife 2b
	0	18.0	17.5			
	5 000	18.5	18.0			
	10 000	19.0	18.5			
	15 000	20.5	20.5			
	20 000	23.5	22.5			
	24 600	24.5	24.5			
	30 000	26.5	25.5			
	40 000	30.5	28.5			
	55 000	35.5	34.5	(Anriß sichtbar)		
	62 000	-	-	10.0		
	65 200	40.5	40.5	11.5		
	70 200	43.5	43.5	15.5		
	75 200	46.5	47.0	18.5		
	80 000	49.5	51.0	21.0		
	85 000	53.5	55.0	24.0		
	90 000	57.5	59.5	28.0		
	95 000	61.0	64.0	31.5		
	100 000	64.0	68.0	35.5		
	105 000	68.0	72.5	41.0		
	110 000	72.5	77.5	47.0		
	115 000	78.5	84.5	53.5		
	120 000	86.5	92.5	61.5		
	125 000	96.0	102.5	66.5		
	130 000	105.0	112.5	(fast		
	135 000	120.0	126.5	durchtrennt)		
	140 000	129.5	139.5			
	145 000	145.5	153.5			
	150 100	158.5	167.5			
	155 100	161.0	170.0			
	160 100	163.0	173.0			
	165 100	164.5	174.5			
	170 100	165.5	175.5			
	175 100	169.0	180.0			
	180 100	174.0	185.0			
	185 100	180.0	191.0			
	190 100	187.5	198.0			
	195 100	195.0	205.5			



Tabelle 2 : Gemessene Rißlängen beim Modell 1

$\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Last- wechsel- Zahl n	Rißlänge a, a <sub>1</sub> , a <sub>2</sub> [mm]							
		Platte Seite a	Platte Seite b	Steife 1	Steife 2a	Steife 2b			
	200	100	204.5	215.0					
	205	100	215.0	225.0					
	210	100	227.0	236.0					
	215	100	236.5	246.5					
	220	000	247.0	257.5		7.0			
	225	000	258.5	269.5		8.5			
	230	000	272.0	283.0		9.5			
	235	000	284.0	296.0		10.5			
	240	000	300.5	310.0		11.5		7.0	
	245	000	341.5	353.5		13.0		8.5	
	250	000	357.0	358.5		14.5		10.0	
	255	000	363.0	363.5		15.5		11.0	
	260	000	367.5	367.0		16.5		12.0	
	265	000	372.5	370.5		18.0		13.0	
	270	000	380.0	376.0		20.0		14.0	
	275	000	390.0	384.0		21.5		15.5	
	280	000	406.5	394.5		24.5		17.5	
	285	000	422.5	405.5		31.5		19.5	
	290	000	455.0	(Riß unter Steife 2b)		46.5		24.0	
	295	000	466.0			52.0		26.0	
	300	000	474.5			57.5		28.0	
	305	000	487.0			64.5		30.5	
	310	000	505.0	428.0		75.5		33.5	
	315	000	525.5	449.5		82.5		38.5	
	320	000	531.0	454.0		85.5		41.5	
	325	000	534.5	458.5		88.0		44.5	
	330	000	538.5	463.0		92.0		48.0	
	335	000	545.5	473.5		(durchtrennt)		52.5	
	340	000	553.0	487.0				59.5	
	345	000	564.5	502.0				66.0	
	350	000	575.5	518.5				71.5	

Tabelle 2 : Gemessene Rißlängen beim Modell 1 (Fortsetzung)

$\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Last- wechsel- Zahl n	Rißlänge a, a <sub>1</sub> , a <sub>2</sub> [mm]					
		Platte Seite a	Platte Seite b	Steife 1	Steife 2a	Steife 2b	
<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="margin-bottom: 20px;">133</div> <div style="margin-bottom: 20px;">*</div> <div>113</div> </div>	0			17.0			
	2 600			23.0			
	6 450			31.0			
	10 100			51.5			
	11 100			65.0			
	11 820			(durchtrennt)			
	16 100		(sichtbarer Anriß)				
	38 200		(Riß an Plattenunterseite)				
	45 000		21.0	23.0			
	50 000		24.5	27.0			
	55 000		29.5	31.5			
	60 000		33.5	37.0			
	65 000		40.5	43.5			
	70 000		46.5	50.5			
	75 000		53.0	58.0			
	80 000		60.0	65.0			
	85 000		67.0	72.0			
	90 000		73.5	80.0			
	95 000		81.0	89.0			
	100 000		91.0	99.0			
	105 000		100.5	111.0			
	110 000		113.5	123.0			
	115 000		127.0	138.5			
	120 000		142.5	154.0			
	125 000		160.5	170.5			
	130 000		177.5	188.0			
	135 000		196.0	207.0			
	140 000		202.0	214.5			
	145 000		210.0	222.5			
	150 000		219.5	231.5			
	155 000		229.0	242.0			
	160 000		241.5	253.5			
	165 000		253.5	266.0			
170 000		266.0	279.5				
175 000		279.0	293.0				
180 000		292.5	306.0				
185 000		308.0	322.5				

Tabelle 3 : Gemessene Rißlängen beim Modell 2

$\Delta\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Last- wechsel- Zahl n	Rißlänge a, a <sub>1</sub> , a <sub>2</sub> [mm]				
		Platte Seite a	Platte Seite b	Steife 1	Steife 2a	Steife 2b
113 *   87   * 69	190 000	325.0	339.5			
	195 000	344.0	359.5			
	200 000	348.5	362.5			
	205 000	351.0	366.0			
	210 000	353.5	368.5			
	215 000	355.5	370.5			
	220 000	357.5	372.0			
	225 000	359.5	373.5			
	230 000	362.0	375.5			
	235 000	365.0	378.0			
	240 000	368.0	380.5			
	245 000	371.5	383.5			
	250 000	375.5	386.5			
	255 000	379.5	389.5			
	260 000	384.0	392.5			
	265 000	388.5	396.0			
	270 000	393.5	399.5			
	275 000	399.5*	402.0*			
	280 000	405.0*	405.5*			
	285 000	410.0*	409.0*			
	290 000	413.5*	412.5*			
	295 000	418.0*	417.0*			
	300 000	423.0*	421.5*			
	305 000	429.0*	424.5*		6.0	6.5
	310 000	442.0*	435.5*		20.5	17.5
	315 000	467.0	455.0		39.0	35.0
	320 000	492.0	497.0		63.0	56.0
	324 000	513.0	501.0		81.0	71.5
	330 000	556.0	534.0		101.0	92.5
	335 000	591.0	564.5		113.5	107.0
	340 000	600.0	573.0	(durchtrennt)		111.0
	345 000	610.0	580.0			114.0
	350 000	622.0	598.0			(durchtrennt)
	355 000	637.5	618.0			
	360 000	655.5	638.0			
	365 000	676.0	660.5			
	370 000	697.5	684.0			

\* Rißlänge an der Plattenunterseite

Tabelle 3 : Gemessene Rißlängen beim Modell 2 (Fortsetzung)