

# Mechanische Werkstoffprüfung – klassische Verfahren und neue Entwicklungen

Vorlesung Abt. IIID/SS02

Dozent: Dr. H.J. Schindler

e-mail: schindler@mat-tec.ch

## Teil II: Mechanische Verfahren zur Bestimmung von Eigenspannungen

### 1. Einleitung

Wird aus einem eigenspannungsbehafteten Bauteil durch Schneiden, Bohren, Fräsen oder andern Bearbeitungsmethoden ein Stück Material entfernt, werden entlang der dabei neu gebildeten Oberflächen die Spannungen zum Verschwinden gebracht. Aus Gleichgewichtsgründen muss damit eine Umlagerung der Eigenspannungen im ganzen Körper erfolgen, was mit Dehnungen und Formänderungen verbunden ist. Auf diesem Effekt, der in der spanabhebenden Metallbearbeitung oft als "Verzug" störend in Erscheinung tritt, basieren im allgemeinen die mechanischen Verfahren zur Ermittlung von Eigenspannungen: Aus dem zu untersuchenden Prüfkörper wird an der interessierenden Stelle etwas Material entnommen und die dadurch erzeugten Formänderungen oder Dehnungen werden mit geeigneten Mitteln gemessen. Aus der Änderung der Messwerte vor und nach bzw. während der mechanischen Bearbeitung lassen sich Rückschlüsse auf die zuvor an der betreffenden Stelle vorhanden gewesenen und nunmehr gelösten Eigenspannungen ziehen. Die Vorteile der mechanische Verfahren liegen generell darin, dass sie einerseits relativ einfach durchzuführen sind, dass weitgehend mit herkömmlichen Messmitteln wie Dehnungsmessstreifen oder Mikrometer gearbeitet werden kann, dass bei einigen Methoden auch gewisse Aussagen zur Verteilung der Eigenspannungen über einen Querschnitt möglich sind und dass direkt die technisch oft am meisten interessierenden globalen Eigenspannungen (Eigenspannungen "der ersten Art") in ingenieurmässig gut interpretierbarer Form geliefert werden. Diesen Vorteilen steht als schwergewichtigster Nachteil gegenüber, dass sie naturgemäss mehr oder weniger "zerstörend" sind. Damit ist ihr Einsatzbereich auf Vergleichsstücke des eigentlichen Untersuchungsobjekts beschränkt.

Zur Einteilung der Messverfahren in "zerstörende" und "zerstörungsfreie" ist allerdings relativierend anzumerken, dass eine solche oft nicht eindeutig ist: Zum einen gibt es auch die Zwischenstufen der "teil-zerstörenden" Verfahren (siehe Abschnitt 3), bei welchen das Prüfstück nur lokal etwas geschädigt, global aber in seiner ursprünglichen Form erhalten und somit möglicherweise - je nach Anforderungen - noch funktionsfähig bleibt. Zum anderen bedarf es auch bei den sogenannten zerstörungsfreien Verfahren oftmals vorgängiger Schnitte oder anderer "zerstörender" Bearbeitungsschritte, etwa um das Prüfstück in Form und Grösse an die Erfordernisse des jeweiligen Prüfverfahrens und Prüfgerätes anzupassen, oder um Aussagen über den Verlauf der Eigenspannungen in die Tiefe machen zu können. In diesen Fällen stellen die mechanischen Verfahren eine notwendige Ergänzung zu den übrigen Methoden der Eigenspannungsmessung dar.

So zahlreich wie die Möglichkeiten zur Entspannung von Eigenspannungen durch mechanisches Bearbeiten sind die Messmethoden. Die Wahl des geeigneten Verfahrens muss sich nach der Bauteilform, der erforderlichen Genauigkeit, der erforderlichen räumlichen

Auflösung und den vorhandenen Messmitteln richten. Generell ist festzustellen, dass eine erhöhte Aussagekraft der Resultate oder eine Verringerung des experimentellen Aufwands im allgemeinen mit einem Mehraufwand seitens begleitender theoretischer Berechnungen notwendig ist. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit werden im vorliegenden Bericht die wichtigsten der klassischen mechanischen Verfahren kurz vorgestellt (Kapitel 2 und 3). Für Auswertungsformeln, Details der Versuchsdurchführung und Beispiele wird jedoch auf die Literatur verwiesen [1 - 3].

Etwas ausführlicher wird in Kapitel 4 auf eine neue, noch wenig bekannte Methode, die sogenannte Crack-Compliance Methode (CC-Methode) eingegangen. Die Vorteile dieser Methode, an deren Entwicklung Mat-Tec massgeblich beteiligt ist, liegen generell darin, dass - anders als mit den meisten anderen Methoden - die Eigenspannungen mit vergleichsweise geringem Messaufwand nicht nur punktuell an der Oberfläche, sondern in ihrem Verlauf über einen ganzen Bauteilquerschnitt bestimmt werden können. Als zweiten wichtigen und einzigartigen Vorteil erlaubt sie, auch die Spannungsintensitätsfaktoren (SIF) zu bestimmen, die sich im Fall von Rissen infolge der Eigenspannungen einstellen. Zurzeit ist eine „Task-Group“ des ASTM daran, einen Norm-Entwurf für die Cut-Compliance Methode zu erarbeiten

Diese beiden Möglichkeiten der Crack Compliance Methode sind vor allem dann von Nutzen, wenn die Eigenspannungen nicht nur gemessen, sondern auch in ihren Auswirkungen auf die Sicherheit oder die Lebensdauer des betreffenden Bauteils beurteilt werden sollen. Eigenspannungen sind in dieser Hinsicht erfahrungsgemäss insbesondere dann von Bedeutung, wenn die Beanspruchungsbedingungen eine Rissbildung und nachfolgendes unterkritisches Risswachstum erlauben oder fördern. Dies ist namentlich bei wiederholter, zyklischer Beanspruchung (Ermüdungsrisswachstum) oder chemischer Schädigung des Materials an der Rissspitze beispielsweise durch Wasserstoffversprödung oder durch ungünstige Umgebungseinflüsse (Spannungsrisskorrosion) der Fall. Zur rechnerischen Behandlung solcher Problemstellungen, beispielsweise zur Berechnung der Lebensdauer oder der Bruchsicherheit mit bruchmechanischen Theorien, bedarf es der Kenntnis der durch die Eigenspannungen an Rissen erzeugten lokalen Beanspruchung, die durch die erwähnten SIF charakterisiert wird (siehe z.B. [4]). Zur Berechnung dieser von der Risttiefe und den Spannungen abhängigen Parameter müssen - neben den Spannungen aus den äusseren Lasten - auch die im Bereich des Risses wirkenden Eigenspannungen in ihrem Verlauf in Tiefenrichtung bekannt sein [5].

## **2. Zerschneide- und Abtragverfahren**

### **2.1. Ausschneiden**

*Vorteile: generell anwendbar, wenig theoretische Vorarbeiten erforderlich.*

*Nachteile: Grosser Mess- und Bearbeitungsaufwand (Schneiden), nur bei ebenen Spannungszuständen genau (Biegeeffekte können die Resultate stark beeinflussen).*

Das Freischneiden oder vollständige Ausschneiden ist die direkteste und universellste Art der Eigenspannungsmessung. Das Prinzip besteht einfach darin, die interessierende Stelle, die zuvor mit Dehnungsmessstreifen (DMS) versehen wurde, durch Schnitte soweit vom übrigen Körper zu isolieren, dass die wesentlichen Anteile der Eigenspannungen gelöst werden. Somit lassen sich aus den Signalen der DMS direkt die entlang dieser Schnitte vorhanden gewesenen Eigenspannungen, bzw. ihren über die Schnittflächen gemittelten Werten, mit Hilfe des Hooke'schen Gesetzes bestimmen. Um alle drei Komponenten des ebenen Spannungszustands zu erhalten, muss die Messung durch eine sogenannte DMS-Rosette, die eine Messung in drei Richtungen erlaubt, erfolgen. Die Methode ist offensichtlich mit einem relativ grossen Mess- und Schneidaufwand verbunden. Da der Aufwand für das Ausschneiden des ersten Stück aus geometrischen Gründen der grösste ist, ist es zweckmässig, wenn schon dann gleich an mehreren benachbarten Stellen zu messen ("vollständiges Zerlegen"). Die Genauigkeit der Methode hängt von der Grösse der ausgeschnittenen Stücke, der Art der Schnitte und der Grösse der Spannungsgradienten (Variation der Spannungen innerhalb des Ausschnitts) ab.

## 2.2. Biegemethoden

Vorteile: vereinfachte und damit weniger fehlerempfindlichen Messung (mechanische Messuhren oder Mikrometer genügen in den meisten Fällen); Aussagen zum Verlauf der Spannungen über einen Querschnitt.

Nachteile: erhöhter theoretischer Aufwand; Kenntnis des qualitativen Verlaufs der Eigenspannungen notwendig

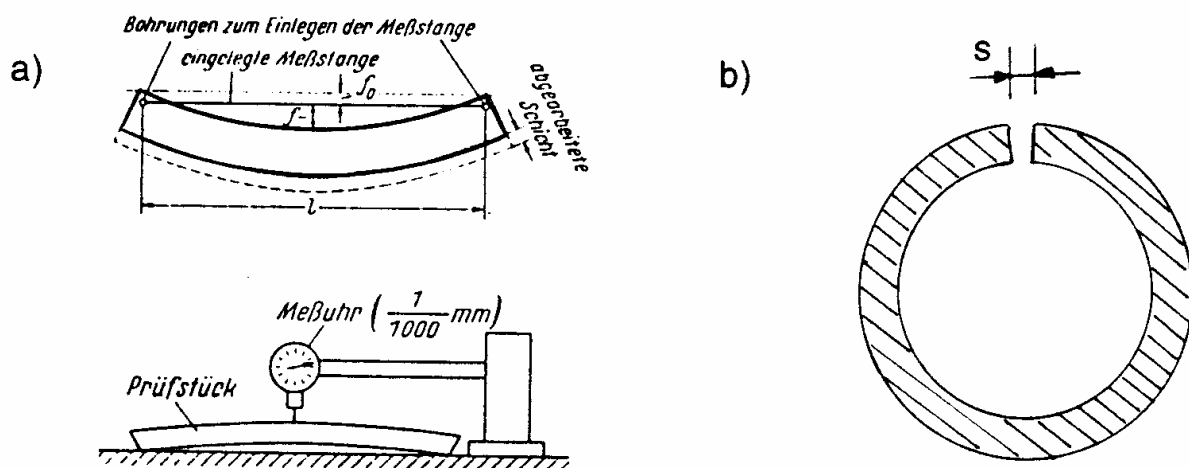


Fig. 1: Beispiele für die Anwendung von Biegemethoden:

a) Messung der Durchbiegung  $f$  bei schichtweisem Abtragen eines Plattenstreifens bei grossen (oben) oder kleineren (unten) Prüflingen

b) Messung der Schnittaufweitung  $s$  bei radialem Schnitt durch Ring oder Rohr

Im Unterschied zum Ausschneiden werden bei dieser Methode die Schnitte nicht möglichst nahe an die Messstelle, sondern so gelegt, dass eine möglichst grosse Verformung des teilweise freigeschnittenen Stücks entsteht, um die Messung einfacher und weniger

fehlerempfindlich zu machen. Die Idee ist, den Körper selbst gewissermassen als Übersetzungshebel der Verformung zu benützen. Dies ist im allgemeinen dann möglich, wenn das Eigenspannungsfeld in eine Richtung einigermaßen homogen ist und wenn die beim Schneiden gelösten Eigenspannungen eine Biege Wirkung auf das zu messende Stück ausüben. Dies ist namentlich bei stabförmigen Bauteilen (Balken, Rohre, Platten, etc.) der Fall. Im einzelnen muss sich die Wahl der Schnitt- und Messanordnung nach der jeweiligen Form und dem vermuteten Eigenspannungszustand richten. Zwei Beispiele sind in Fig. 1 gezeigt. Um aus den gemessenen Verschiebungen die Eigenspannungen zu bekommen, ist eine vorgängige theoretische Analyse notwendig. Oftmals können auch Informationen über den Verlauf der Eigenspannungen über die Dicke des betrachteten Bauteilquerschnitts gewonnen werden können.

### **2.3. Ausbohr- und Abdrehverfahren**

*Vorteile: Der Spannungszustand lässt sich vollständig bestimmen, inklusive der Variation über den Querschnitt*

*Nachteile: Anwendung beschränkt auf rotationssymmetrische Bauteile, relativ grosser Bearbeitungsaufwand (schonendes Abdrehen bzw. Bohren erforderlich).*

Diese Verfahren (z.B. Ausbohrverfahren nach Sachs [6]) eignen sich zur Bestimmung der Eigenspannungen in rotationssymmetrischen Bauteilen mit rotationssymmetrischem Eigenspannungsverlauf (z.B. dickwandige Rohre, Ringe und zylindrische Stäbe). Dabei wird der Rohrförmige Prüfling (Rundstäbe müssen zuerst durch eine Zentralbohrung zu einem dickwandigen "Rohr" gemacht werden), an dessen äusserer Mantelfläche die Entspannung mit Dehnungsmessstreifen gemessen wird, durch sukzessives weiteres Bohren mit zunehmend grösseren Bohrradien von innen her Schicht um Schicht abgetragen. Aus den gemessenen Dehnungsänderungen lassen sich mit Hilfe der allgemeinen Gleichgewichtsbedingungen einer Zylinderschale und unter Annahme eines rotationssymmetrischen Spannungszustands alle vier Spannungskomponenten als Funktion des Radius berechnen. Analog ist auch ein schichtweises Abdrehen von aussen mit Dehnungsmessung an der Innenfläche möglich.

## **3. "Halb-zerstörende" und „zerstörungsfreie“ Verfahren**

### **3.1. Bohrlochmethode**

*Vorteil: Relativ einfache, genormte Methode; lokale Messung mit relativ guter räumlicher Auflösung.*

*Nachteil: Messung nur an der Oberfläche möglich; störende plastische Effekte bei hohen Eigenspannungen.*

Die Bohrlochmethode ist das wohl am häufigsten angewendete mechanische Verfahren der Eigenspannungsmessung, und das einzige, für welches eine international anerkannte Norm (ASTM E 837-99, Ref. [7]) existiert. Zur lokalen Entspannung der Eigenspannungen wird an der interessierenden Stelle der Oberfläche durch Bohren ein Sackloch mit einem Durchmesser

$D_0$ . Die resultierenden Dehnungen werden mit drei DMS, die radial um das Loch herum angeordnet sind, gemessen (Fig. 3). Die Bohrtiefe muss dabei mindestens  $0.4D$  betragen, wobei  $D$  den Durchmesser des durch die DMS gebildeten Kreises bezeichnet. Durch die Verwendung von drei DMS lassen sich alle drei Komponenten des an der Oberfläche herrschenden Spannungszustands berechnen. Die entsprechenden Formeln sind in [7] zu finden. In seiner standardisierten Version ermöglicht die Methode lediglich die Bestimmung der Eigenspannungen an der Oberfläche. Durch stufenweises, sukzessives Bohren in die Tiefe und verfeinerten Auswertungen aufgrund von Finite-Elemente-Berechnungen lassen sich aber auch Informationen über deren Verlauf bis zu einer Tiefe von rund einem Bohrlochdurchmesser gewinnen. [8, 9]. Durch spezielle Formgebung des Bohrlochs lässt sich die Empfindlichkeit der Messung noch etwas steigern [10]

### 3.2. Ring-Kern-Verfahren

Vorteil: Eingriff geringer als beim Bohrlochverfahren; praktisch vollständige Entspannung; stufenweises Bohren zur Bestimmung des Spannungsgradienten in die Tiefe möglich.

Nachteil: Bohrung und Messung aufwendig (Spezialwerkzeuge und Messmethode notwendig)

Diese auch als "Trepanierverfahren" bekannte Methode der lokalen Eigenspannungsmessung weist gewisse Ähnlichkeiten mit dem Bohrlochverfahren auf. Anstelle eines Lochs wird hier jedoch mittels eines entsprechenden speziellen Fräses ein kreisförmiger Einschnitt erzeugt. Ab einer gewissen Tiefe (ca. ein Durchmesser  $D_0$  des Einschnitts) wird die Oberfläche innerhalb des Kreises praktisch vollständig entspannt. Die dort mit DMS (wenn möglich mit einer DMS-Rosette zur Bestimmung aller drei Spannungskomponenten) gemessenen Spannungen entsprechen somit den Eigenspannungen, die zuvor an dieser Stelle zugegen waren.

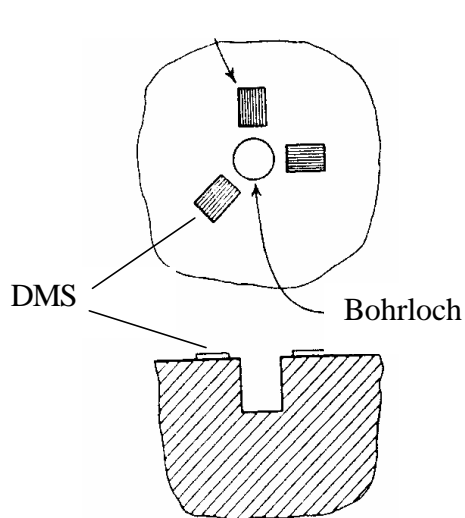


Fig. 2: Bohr- und Messanordnung bei der Bohrlochmethode

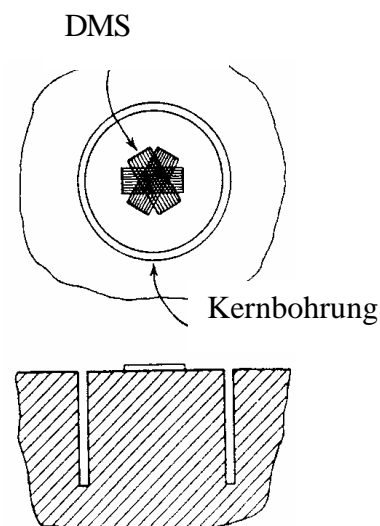


Fig. 3 Bohr- und Messanordnung beim Trepanierverfahren

### 3.3. Härte-Verfahren

*Vorteil:* Einfaches Verfahren, wenig Beschädigung des Prüflings

*Nachteil:* Geringe Auflösung; nur qualitative Aussagen möglich; Vergleichsreihe (Kalibrationsversuche) erforderlich

Die Härte charakterisiert den Widerstand eines elastisch-plastischen Werkstoffs gegen das Eindringen eines harten Eindringkörpers und widerspiegelt damit den Fließwiderstand des Werkstoffs unter mehrachsiger lokaler Pressung. In den plastischen Fließgesetzen treten u.a. auch die im Bereich der Oberfläche vorhandenen Spannungen auf, und damit auch die Eigenspannungen: Zugspannungen erleichtern das Eindringen des Prüfkörpers, Druckspannungen erschweren es. Bei Zugspannungen in der Nähe der Oberfläche misst man somit eine scheinbar geringere Härte, bei Druckspannungen eine etwa höhere (der Einfluss ist in dieser Beziehung nicht symmetrisch). Diese Effekte lassen sich im Prinzip zur Beurteilung der Eigenspannungen ausnützen. Sie sind im allgemeinen jedoch relativ gering, so dass sie oft, namentlich bei mobilen Härtemessungen, ins Streuband der Härtemessung fallen. Dafür ist die Beschädigung des Prüflings sehr gering. Die Methode gilt als praktisch zerstörungsfrei.

## 4. Crack-Compliance- Verfahren

### 4.1. Prinzip

Bei der von Cheng und Finnie [11, 12] entwickelten Crack-Compliance-Methode (CC-Methode) erfolgt die Entspannung durch einen Schnitt entlang der Linie, auf der die Eigenspannungen zu bestimmen sind. Der Schnitt wird kontinuierlich oder in kleinen Schritten verlängert. Die daraus resultierende Umlagerung der Eigenspannungen wird an einer beliebigen Messstelle an der Oberfläche des Körpers mit einem Dehnungsmessstreifen (DMS) gemessen. Aus dem mathematischen Zusammenhang zwischen der durch den Schnitt freigesetzten Spannung und der Dehnungsänderung im Messpunkt, der für die jeweilige Bauteilgeometrie und Messanordnung bekannt sein muss, lässt sich aus dem Verlauf der Messwerte als Funktion der Schnitttiefe die ursprüngliche Spannungsverteilung entlang der Schnittlinie berechnen.

Die Wahl eines Schnittes zur Entspannung der Eigenspannungen sowie die relativ weit davon entfernte Messstelle haben verschiedene Vorteile: Erstens stellt der schmale, vorzugsweise durch Draht-Elektroerosion erzeugte Schnitt - was die Verletzung des Materials und die Gefahr der Einbringung zusätzlicher Eigenspannungen betrifft - den kleinsten mechanischen Eingriff mit der grössten Entspannungswirkung dar. Zweitens ermöglicht sie, da der Schnitt hinsichtlich des globalen elastischen Spannungsfelds einem Riss ähnlich ist, zur Berechnung der ursprünglichen Spannungen aus der Dehnungsänderung im Messpunkt den Rückgriff auf die theoretischen Grundlagen der linear-elastischen Bruchmechanik und damit eine bedeutende Vereinfachung der Berechnungsmodelle. Drittens erhält man damit - wie einleitend erwähnt und nachfolgend gezeigt - direkt die Spannungsintensitätsfaktoren an einem realen oder hypothetischen Riss, der im betrachteten Eigenspannungsfeld liegt.

## 4.2. Theoretische Zusammenhänge

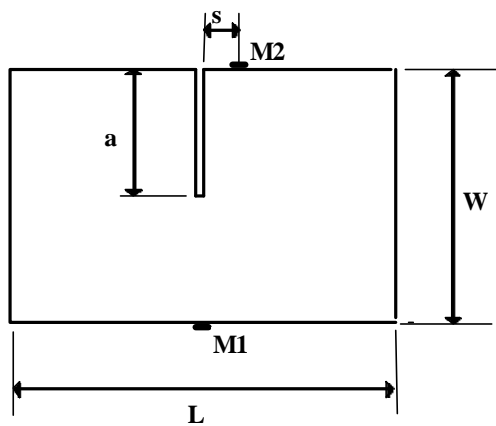
Hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das globale Spannungsfeld verhalten sich ein Schnitt und ein Riss gleicher Länge praktisch gleich. Damit lässt sich die Dehnungsänderung an einer beliebigen Stelle M infolge einer Verlängerung des Schnittes der momentanen Länge a mit Hilfe bruchmechanischer Beziehungen berechnen (Fig. 4). Man erhält die allgemeine Beziehung zwischen der durch den Spannungsintensitätsfaktor  $K_{Irs}$  gegebenen Rissbeanspruchung und der Dehnungsänderung  $d\varepsilon_M/da$  im Messpunkt M [13, 14]:

$$K_{Irs} = \frac{E' F}{B} \left( \frac{\mathcal{K}_{IF}}{\mathcal{I}_s} \right)^{-1} \frac{d\varepsilon_M}{da} \quad (1)$$

wobei

$$Z(a) = \frac{B}{F} \left( \frac{\mathcal{K}_{IF}}{\mathcal{I}_s} \Big|_{s=0} \right) \quad (2)$$

$K_{IF}$  bezeichnet dabei den SIF infolge des in Fig. 4 gezeigten Hilfskräftepaars F, das im Abstand  $\pm s$  von M angreift, B die Dicke und E' den verallgemeinerten E-Modul. Zur experimentellen Bestimmung von  $d\varepsilon_M(a)/da$  muss der Schnitt der Länge a, unter gleichzeitiger Messung der resultierenden Dehnung in M mittels eines DMS, kontinuierlich oder schrittweise verlängert werden.



*Fig. 4: Prinzip der Crack Compliance  
Methode: Schnitt entlang x-Achse,  
Dehnungsmessung im Punkt M*

Zur Anwendung von Gl. (1) bedarf es insbesondere der Kenntnis der in (2) definierten Funktion  $Z(a)$ , die als Einflussfunktion bezeichnet wird. Der Wert dieser Funktion charakterisiert die Sensitivität der Dehnung im Messpunkt M bezüglich einer Schnittverlängerung: je grösser der absolute Wert von  $Z(a)$ , desto grösser die Sensitivität des Messpunkts M. Deshalb ist M jeweils so zu wählen, dass über einen möglichst grossen Bereich der Schnittlänge a eine möglichst hohe Sensitivität vorliegt. Bei relativ kurzen, vom Rand ausgehenden Schnitten ist dies im Allgemeinen ein Punkt in der Nähe des Schnittendes, bei tieferen Schnitten ein

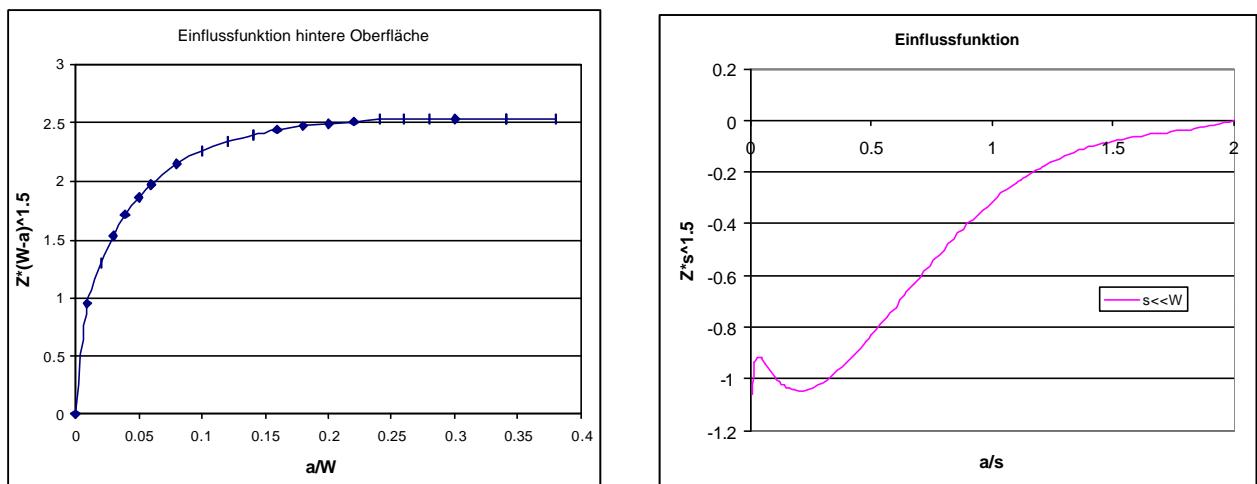
Punkt auf dem gegenüberliegenden Rand in der Nähe oder auf der x-Achse.

### 4.3. Berechnung der Einflussfunktion

Die Berechnung der von der Bauteilgeometrie und der Lage der Schnittlinie  $x$  und des Messpunkts  $M$  abhängigen Einflussfunktion  $Z(a)$  ist der aufwendigste und anspruchsvollste Arbeitsschritt in der Anwendung der CC-Methode. Da sie aber insbesondere nicht vom Lastfall abhängt, muss sie für eine bestimmte Bauteilform nur einmal erfolgen. Sie lässt sich entweder analytisch nach Gleichung (2) bestimmen, wozu der Verlauf des SIF infolge der virtuellen Kräfte  $F$ ,  $K_{IF}(s)$ , zu berechnen und nach  $s$  abzuleiten ist, oder mit der Beziehung

$$Z(a) = \frac{E'}{K_{Iref}(a)} \cdot \frac{d\epsilon_{Mref}}{da}(a) \quad (3)$$

wobei  $K_{Iref}$  und  $\epsilon_{Mref}$  den SIF bzw. die Dehnung in  $M$  für einen beliebigen Referenzlastfall des betrachteten Bauteils bezeichnen. Einige Lösungen sind in [13 - 16] zu finden. Fig. 5 zeigt als Beispiel den mit numerischen Mitteln (FE-Berechnung) erhaltenen Verlauf von  $Z(a)$  für rechteckförmige Platten mit zentralem Randschnitt und Dehnungsmessung auf der gegenüberliegenden Seite, sowie für eine Kreisscheibe mit radialem Schnitt.



*Fig. 5: Verlauf der Einflussfunktion  $Z(a)$  für die Messtellen  $M1$  (links) und  $M2$  (rechts) gemäss Fig. 4*

Bemerkenswert ist, dass für verschiedene Systeme analytische, geschlossene Lösungen von zum Teil erstaunlicher Einfachheit berechnet werden konnten. Als Beispiel sei die Lösung für die Kreisscheibe mit Randschnitt angeführt [13]:

$$Z(a) = -\frac{7.952}{\mathbf{p} \cdot D^{3/2}} \cdot \sqrt{\frac{a/D}{(1-a/D)^3}} \quad (4)$$

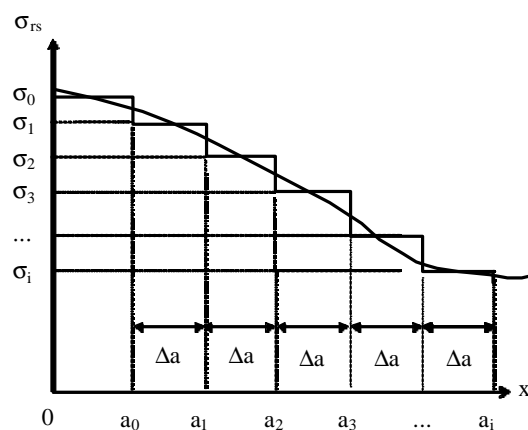
Hierin bezeichnet  $D$  den Scheibendurchmesser und  $a$  die Schnitttiefe.

#### 4.4. Bestimmung der Spannungen

Wäre der Verlauf der Eigenspannungen  $\sigma_{rs}(x)$  über die Schnittfläche bekannt, liesse sich der Spannungsintensitätsfaktor daraus mit der allgemeinen Gleichung

$$K_{Irs}(a) = \int_0^a h(x, a) \cdot \sigma_{rs}(x) \cdot dx \quad (5)$$

berechnen. Dabei stellt  $h(x, a)$  die sogenannte Gewichtsfunktion nach Bueckner [17] dar, die für verschiedene Prüfkörper- und Schnittgeometrien bekannt ist oder relativ einfach bestimmt werden kann [18, 19]. Im vorliegenden Fall stellt sich das in der Bruchmechanik ungewohnte inverse Problem, aus einem bekannten Verlauf von  $K_{Irs}(a)$  die dazugehörige Spannungsverteilung  $\sigma_{rs}(x)$  zu finden. In [11, 12] wird das Problem durch eine Überlagerung einer Anzahl möglicher Grundfunktionen, z.B. in Form einer Fourierreihe mit harmonischen Funktionen. Ein allgemeinerer Lösungsweg, der auch in den nachfolgend gezeigten Beispielen benützt wurde, ist die in [20, 21] aufgezeigt Methode der schrittweisen Vorwärtsintegration. Dabei wird die zu bestimmende Spannungsverteilung wie in Fig. 6 schematisch dargestellt sukzessive in kleinen Schritten  $\Delta a$  aus (5) berechnet.



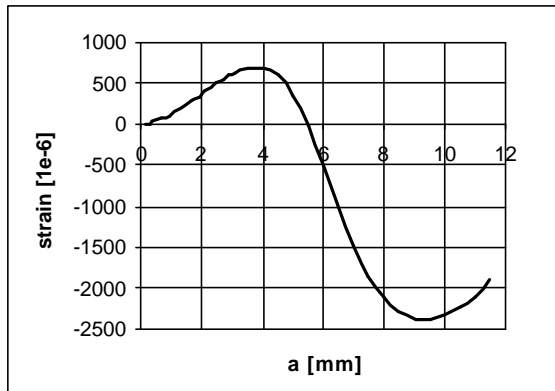
*Fig. 6: Approximation der gesuchten Spannungsverteilung durch inkrementelle Schritte*

#### 4.5. Beispiele experimenteller Ergebnisse

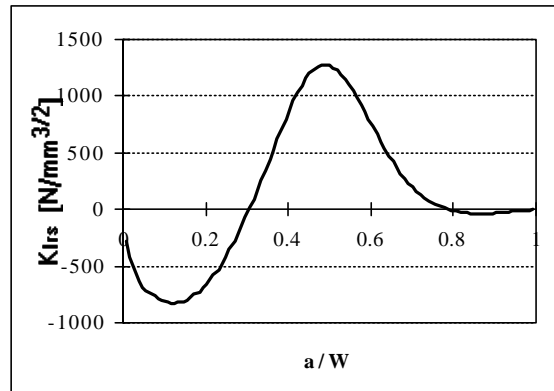
In Fig. 7 ist der Verlauf der Eigenspannungen und des SIF gezeigt, die in einem Balken der Höhe  $W=12\text{mm}$  aus hochfestem Stahl gemessen wurden. Die Eigenspannungen stammen aus einer zuvor erlittenen Überlastung durch reine Biegung (Belastung über die Elastizitätsgrenze hinaus, anschliessend Entlastung). Der Schnitt erfolgte durch Drahterosion, wobei sich eine Schnittbreite von rund  $0.3\text{mm}$  gewählt wurde. Die Dehnung wurde nur an einer einzigen Stelle, auf der Schnittebene ( $y=0$ ) an der Rückseite des Balkens, gemessen. Der Verlauf des SIF (Fig. 7) ergab sich durch Anwendung der in Fig. 5 gezeigten Einflussfunktion auf den gemessenen Dehnungsverlauf. Die Spannungsverteilung wurde aus dem in Fig. 7 gezeigten SIF mit dem in [18] beschriebenen Verfahren berechnet. Die Resultate stimmen sowohl qualitativ und quantitativ gut mit dem aus theoretischen Gründen erwarteten Verlauf überein.

Offensichtlich lässt sich bei solchen relativ geringen Balkenhöhen mit einer einzigen Dehnungsmessstelle praktisch der ganze Querschnitt abdecken. Ein anderes Beispiel ist in Fig. 8 gezeigt.

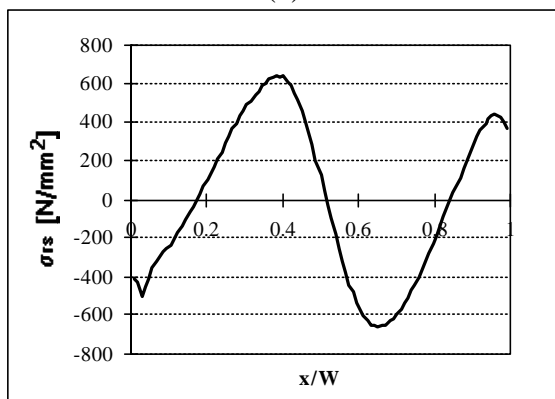
Die CC-Methode eignet sich auch gut zur Erfassung von sehr inhomogenen Spannungsverläufen, wie sie beispielsweise in der Nähe von Schweißnähten auftreten. In Fig. 9 ist als Beispiel der Eigenspannungsverlauf in der Nähe der Schweißnaht zwischen zwei hochfesten Blechen gezeigt.



(a)



(b)



(c)

*Fig. 7: Beispiel einer Eigenspannungsmessung mit der CC-Methode an einem Balken mit  $W=12\text{mm}$  (a) gemessene Dehnung mit DMS1 (siehe Fig. 4) in Funktion der Schnitttiefe (b) daraus berechneter Verlauf von  $K_I$  (c) daraus ermittelter Eigenspannungsverlauf*

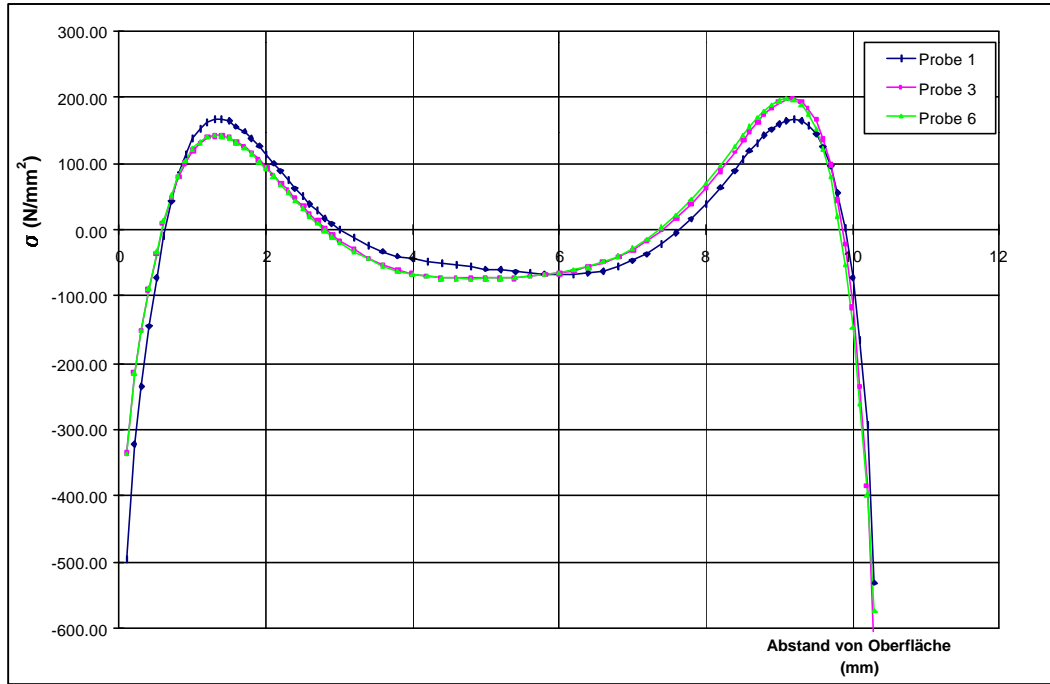


Fig. 8: Mit der CC-Methode gemessene Spannungsprofile in einem vergüteten hochfesten Blech von 10.4 mm Dicke

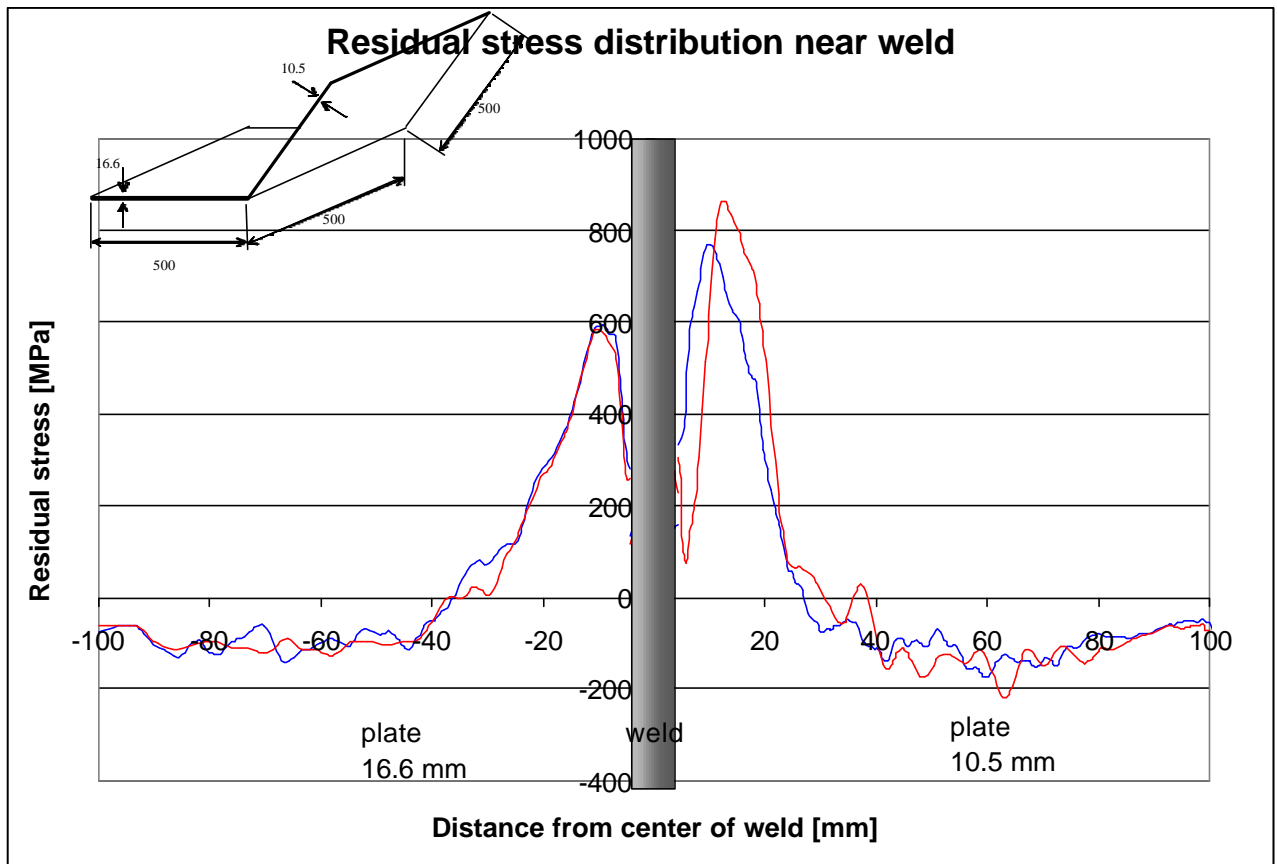


Fig. 9: Eigenspannungen in Nahrichtung in der Nähe eines geschweissten Winkelblechs

## Literaturverzeichnis:

- [1] Tietz, D.D., "Grundlagen der Eigenspannungen", Springer Verlag, 1982,
- [2] Peiter, A. (Hrsg.), "Handbuch der Spannungsmesspraxis. Experimentelle Ermittlung mechanischer Spannungen", Vieweg Verlag, 1992
- [3] Peiter, A., et al., "Verfahren zur Messung von Eigenspannungen, VDI-Bericht 439 71-84 (1982)
- [4] Broek, D., "Elementary Engineering Fracture Mechanics", Martinus Nijhoff Publishers, 4th Ed., 1987
- [5] Schindler, H.J., Morf, U., "Load Bearing Capacity of Cracked Rollers Containing Residual Stresses", in: Proc. 10th European Conf. on Fracture, Ed. K.H. Schwalbe, C. Berger, Vol. II, EMAS Pub., 767-774 (1994)
- [6] Sachs, G., der Nachweis innerer Spannungen in Stangen und Röhren, Zeitschrift für Materialkunde, 19, 352-357, 1929
- [7] American Soc. for Testing and Materials, "Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method, ASTM E 837 - 99, 1999
- [8] Flamann, M.T., Boag, J.M., in : Exp. Mechanics, December 1990, 352-355
- [9] Shaw, D., Chen, H.Y., in: Experimental Mechanics, June 1990, 120-123
- [10] Tootonian, M., Schajer, G.S., Enhanced Sensitivity Residual Stress measurement Using Taper Hole Drilling", Proc. 4th Int. Conf. on Residual Stress, Baltimore, 52-63 (1994)
- [11] Cheng, W., Finnie, I., "Measurement of Residual Hoop Stresses in Cylinders Using the Compliance Method", ASME J. of Eng. Mat. and Tech., 108, 87-92 (1986)
- [12] Cheng, W., Finnie, I., Proc. "An Overview of the Crack Compliance Method For Residual Stress Measurement", 4th Int Conf. On Residual Stress, Baltimore., 449-458, pub. by Soc. Experimental Mechanics (1994)
- [13] Schindler, H.J., "Experimentelle Bestimmung von Spannungsintensitätsfaktoren aus Eigenspannungen", Proc. 27th Vortragsveranstaltung des DVM AK Bruchvorgänge, Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V., Köln, 421-430 (1995)
- [14] Schindler, H.J., Cheng, W., Finnie, I., "Experimental Determination of Stress Intensity Factors due to Residual Stresses", submitted to J. Experimental Mechanics
- [15] Schindler, H.J., Landolt, R., "Experimental determination of residual stress and the resulting stress intensity factors in rectangular plates", to be published in the Proceedings of the 4th Europ. Conf. on Residual Stresses, Cluny, France, 1996.
- [16] Schindler, H.J., Finnie, I. "Residual stresses and stress intensity factors in the ligament of pre-cracked components", submitted to 9th Int. Conf. on Fracture, Sydney, 1997
- [17] Bückner, H., "A Novel Principle for Computation of Stress Intensity Factors", Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik (ZAMM), 50 (1970)
- [18] Wu, X:R., Carlsson, A.J. , "Weight Functions and Stress Intensity Factor Solutions", Pergamon Press, Oxford, (1991)
- [19] Schindler, H.J., "Weight Functions for Deep Cracks and High Stress Gradients" in: Advances in Fracture Resistance and Structural Integrity, Ed. V.V. Panasyuk, et al., Pergamon Press, 193-205 (1994)
- [20] Schindler, H.J., "Determination of residual stress distributions from measured stress intensity factors", Int. J. Fracture, Vol. 74, R23-R30, 1995
- [21] Schindler, H.J., Bertschinger, P. Some Steps Towards Automation of the Crack Compliance Method to Measure Residual Stress Distributions. In: Proc. 5th Int. Conference on Res. Stress, Linköping, June 1997