

Wissenschaftlich-Technische Berichte

FZR- 397

März 2004

ISSN 1437-322X

Matthias Werner und Eberhard Altstadt

Finite-Elemente-Modellierung des Risswachstums an 3-Punktbiegeproben



**Forschungszentrum
Rossendorf**

Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft

Wissenschaftlich-Technische Berichte
FZR-397
März 2004

Matthias Werner und Eberhard Altstadt

Finite-Elemente-Modellierung des Risswachstums an 3-Punktbiegeproben



Forschungszentrum
Rossendorf

Kurzfassung

Das Verhalten einer 3-Punkt-Biegeprobe mit Anriss unter Belastung kann mittels eines Finite-Element-Modells nachgebildet werden. Das Modell ermöglicht die Berücksichtigung von elastisch-plastischem Materialverhalten entsprechend der jeweiligen materialspezifischen Spannungs-Dehnungs-Kurve, welche mit dem Ansatz der multilinearen kinematischen Verfestigung (MKIN) umgesetzt wird. Weiterhin gestattet das Modell die Einbeziehung der realen Rollenkinematik beim Biegevorgang. Für die Beschreibung des Bruchkriteriums wird ein spezielles Damage-Modell verwendet, mit dem man in der Lage ist, das Risswachstums in geeigneter Weise wiederzugeben.

Mit diesem Modell lässt sich auch das Teilentlastungs-Compliance-Verfahren nachbilden. Diese Simulation ermöglicht die Einschätzung von Korrekturansätzen zur experimentellen Risslängenbestimmung über die Compliance-Methode.

Abstract

The behavior of a 3-point bending test with incipient crack under load can be modelled by means of a finite element model. The model makes the consideration of elastic-plastic material behavior possible according to the respective material-specific stress-strain curve, which is converted with the beginning of the multi-linear kinematic hardening (MKIN). Further the model permits the inclusion of the realistic role kinetics within the bending procedure. The simulation of crack growth is realized by a strain based damage model.

The finite element model can also be used to simulate the unloading compliance technique. This simulation makes possible the evaluation of correction approaches used for experimental determination of crack length within the compliance technique.

Inhalt

Kurzfassung	1
Abstract	2
Abkürzungen und Symbole	4
1. Einleitung	5
2. Modellierung	6
3. Rechnungen und Ergebnisse	9
3.1 Testrechnung	9
3.2 Simulation des Compliance-Teilentlastungsversuches	11
4. Zusammenfassung	13
5. Literatur	13
6. Bildanhang mit Abbildungsverzeichnis	15

Abkürzungen und Symbole

COD	crack opening displacement,
FE	finite Elemente
GNT-Modell	Schädigungsmodell nach Gurson, Tveergaard und Needleman
3PB	3-Punkt-Biegeprobe
A_{frac}	Bruchfläche der Zugprobe
Δa	Risswachstum, Rissfortschritt
B	Probenbreite
C	Compliance
D, r	Rollendurchmesser, Rollenradius
D	Damageparameter, Schädigungsmaß
ΔD	incrementelle Schädigung
d_0, d_{frac}	Nenndurchmesser bzw. Bruchdurchmesser der Zugprobe
dy	vertikale Verschiebung der Lastaufbringungsknoten der Probe (Durchbiegung)
E	Elastizitätsmodul
F	Vertikalkraft
F_{frac}	max. Zugkraft beim Bruch der Zugprobe
h	Probenhöhe
h_c	Risstiefe
h_L	Ligamentdicke
K_{Ic}	Bruchzähigkeit, kritische Größe des Spannungsintensitätsfaktors bei Einsetzen des Rissfortschrittes
K_{Jc}	Spannungsintensitätsfaktor berechnet aus dem kritischen Wert des J-Integrals
l	Probenlänge
r	Radius
S	Abstand der Auflagepunkte der Probe
T	Temperatur
t	Zeit
W	Probenhöhe
x_R	Rollweg
x,y,z	Koordinaten
α	Winkel der Rollenauflage
ϵ	Dehnung
$\epsilon_{\text{true}}, \epsilon_{\text{eng}}$	wahre bzw. technische Dehnung
ϵ_{frac}	wahre Bruchdehnung
ρ	Dichte
σ	mechan. Spannung
$\sigma_{\text{true}}, \sigma_{\text{eng}}$	wahre bzw. technische Spannung
σ_{frac}	wahre Bruchspannung
ν	Poissonzahl

1. Einleitung

Für die Sicherheit einer technischen Anlage ist in hohem Grade die Zähigkeit der verwendeten Konstruktionswerkstoffe wichtig. Die Zähigkeit eines Werkstoffes kennzeichnet die Fähigkeit, Spannungen durch Formänderungen abzubauen zu können. Aus bruchmechanischer Sicht kann man sie als Widerstand gegen Initiierung und Wachstum von Rissen verstehen. Die Einhaltung bestimmter minimaler Zähigkeitskennwerte wird oftmals in sicherheitstechnischen Regelwerken vorgeschrieben. Da sich unter dem Einfluss der Betriebsbelastungen das Zähigkeitsverhalten verändern kann (Alterung, Versprödung), ist dies im Verlauf des Lebensalters einer Anlage mit geeigneten Methoden zu überwachen. Diese müssen mit den realen Beanspruchungsbedingungen übereinstimmen, moderat im Prüfaufwand sein und dürfen nur wenig Material benötigen. Mit standardisierten Verfahren zur bruchmechanische Charakterisierung des Zähigkeitsverhaltens, wie dem 3-Punktbiegeversuch, kann man diese Zielsetzung erreichen.

Einige bruchmechanische Kenngrößen (z.B. K_{Ic} , K_{Jc}) zäher Materialien können standardgerecht nur an großen Proben bestimmt werden. Andere wie z.B. die Rissinitiierungszähigkeit (J-Integral bei Risseinleitung) gilt als geometrieunabhängig und kann auch an kleinen Proben bestimmt werden. Die Compliance-Technik als 3-Punkt-Biegeversuch an ermüdungsangerissenen Proben in Charpy-Geometrie (55mm x 10mm x 10mm) ermöglichen die Bestimmung einer vollständigen Risswiderstandskurve mit nur einer Probe.

Bei der Compliance-Bestimmung an 3-Punktbiegeproben (vgl. Bild 1) wird der COD-Wert in Abhängigkeit von der vertikal auf die Probe wirkenden Kraft gemessen. Der COD-Wert wird dabei von mehreren Faktoren beeinflusst:

- von den Materialeigenschaften der Probe,
- von der Geometrie der Probe, insbesondere von der anfänglichen Risstiefe und vom Risswachstum,
- von der Geometrie der gesamten Anordnung, d.h. Probe und Belastungseinrichtung (speziell die Kinematik der Rollenlagerung)
- und von den Materialeigenschaften der Belastungseinrichtung, welche sich ebenfalls unter der wirkenden Kraft verformt.

Der Einfluss des letztgenannten Faktors ist als methodischer Messfehler zu verstehen und wird im allgemeinen als marginal angesehen. Die Methode der Compliance-Bestimmung mit dem Teilentlastungsverfahren dient dazu, den Einfluss der ersten beiden Faktoren zu erfassen. Um den 3. Faktor zu berücksichtigen, ist ein Modell erforderlich, welches die Rollenkinematik einbezieht.

Für die Verbesserung der Genauigkeit der Compliance-Methode und die bessere Einschätzung verschiedenen Korrekturfunktionen für diese Methode /1/ wurde begleitend zu diesem experimentellem Messverfahren ein numerisches Modell erstellt, welches das Verhalten der 3-Punktbiegeprobe wiedergibt. Dabei werden folgende Anforderungen an das Modell gestellt:

- elastisch-plastisches Materialverhalten,
- 3D-Modellierung,
- Berücksichtigung des Risswachstums unter Einbeziehung eines geeigneten Bruchkriteriums,
- Einbeziehung der Rollenkinematik.

2. Modellierung

Für die Modellierung der Probenanordnung wurde der Finite-Element-Code ANSYS verwendet. Das Gesamtmodell umfasst die eigentliche Probe mit einem vorgeprägtem Riss mit optional einstellbarer Risstiefe sowie die Rollenlagerung und einem Teil des Auflagers der Belastungseinrichtung. Das FE-Modell (Bilder 2 und 3) besteht aus mehreren Teilkomponenten:

- dem zentralen Teilstück der Probe, welches die Struktur des Risses beinhaltet. In diesem Bereich wird mit plastisch-elastischem Materialverhalten gerechnet. Die nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Kurve wird mit dem Modell der multilinearen kinematischen Verfestigung (MKIN) umgesetzt. Die Vernetzung erfolgt in diesem Abschnitt mit Volumenelementen (wahlweise SOLID45- oder SOLID95-Elemente). Im Bereich der Rissebene ist das Modell feiner vernetzt. Wie im Bild 3 ersichtlich, kann man durch Festlegen von Symmetriebedingungen in der Rissebene die Ligamentdicke und damit eine beliebige Anfangsrissstiefe einstellen.

- Der restliche Bereich der Probe wird aus Minimierungsgründen für den Rechenaufwand mit 2D-Elementen (PLANE42) nachgebildet. Hier kann mit wahlweise mit elastischem oder elastisch-plastischem Materialverhalten gerechnet werden.
- Die Rollen der Biegeanordnung als weitere Modellkomponente sowie die Teile der Auflagefläche der Belastungseinrichtung werden ebenfalls mit 2D-Elementen (PLANE42) modelliert. Hier gilt rein elastisches Materialverhalten.

Die Kopplung der Teilmodelle erfolgt auf unterschiedliche Weise. Der 3D- und der 2D-Bereich der 3PB wird an den Verbindungsknoten starr gekoppelt (CP-Kommando in ANSYS). Um die Kinematik der Probenbewegung beim Biegevorgang richtig abzubilden, erfolgt die Kopplung von Rolle und Probe sowie mit der Auflage über Kontaktelemente (CONTACT48). Als Reibungsmodell wird die elastische Coulombreibung verwendet und als Reibungsbeiwert mit dem Wert 0.18 gerechnet. Aus Symmetriegründen, sowohl durch die Geometrie bedingt als auch von Seiten der Lastaufbringung her, genügt es ein $\frac{1}{4}$ -Modell zu modellieren. Dennoch umfasst das Modell in Abhängigkeit von der Feinheit der Vernetzung noch etwa 7.000 - 10.000 Knoten und bis zu 30.000 Freiheitsgraden.

Schädigungsmodell:

Zur Beschreibung des Risswachstums innerhalb des FE-Modells ist ein Schädigungsmodell erforderlich, welches das Entkoppeln der Verbindungsknoten bzw. auch die Elementauflösung an der Rissspitze steuert.

Ein Schädigungsmodell, das in Zusammenhang mit duktilem (plastischem) Materialverhalten benutzt werden kann, wurde von Gurson /3/ entwickelt und durch Needleman und Tvergaard /4/ modifiziert. In diesem sogenannten GTN-Modell wird eine isotrope Schädigung durch verteilte Poren vorausgesetzt. Die Materialschädigung wird daher mit einem Void-Anteil verbunden (entsprechend dem Volumen der Mikrorisse und der Poren). Insbesondere der Einfluss der Triaxialität wird durch das GTN-Modell gut beschrieben, da der hydrostatische Druck über die plastische Fließbedingung das Porenwachstum und damit auch die plastische Volumendehnung beeinflusst. Jedoch ist die Formulierung des GNT-Modells aufgrund der Vielzahl unabhängiger Parameter sehr aufwendig. Daher wird hier ein

einfacheres Konzept benutzt, welches die Schädigung infolge der Materialbelastung inkrementell bestimmt.

Dieses Schädigungsmodell zur Steuerung der Rissöffnung wurde in den FE-Code ANSYS als ein zusätzliches Modul implementiert. Dieses Modul /2/ beschreibt die Materialschädigung unter anderem auch durch die prompte plastische Verformung der Struktur. Dabei wird ein Schädigungsmaß D ermittelt, welches inkrementell nach jedem Lastschritt bestimmt und aufsummiert wird. Das Schädigungsinkrement berechnet sich nach:

$$\Delta D = \left[\frac{\Delta \varepsilon_{\text{eqv}}^{\text{cr}}}{\varepsilon_{\text{frac}}^{\text{cr}}(\sigma, T)} + \frac{\Delta \varepsilon_{\text{eqv}}^{\text{pl}}}{\varepsilon_{\text{frac}}^{\text{pl}}(T)} \right] \cdot R_v \quad (2.1)$$

mit $\varepsilon_{\text{frac}}^{\text{cr}}(\sigma, T)$ der Bruchdehnung für das Kriechen und $\varepsilon_{\text{frac}}^{\text{pl}}(\sigma, T)$ der plastischen Bruchdehnung (wahre Dehnung). R_v ist eine Funktion, die das Schädigungsverhalten in Abhängigkeit von der betrachtet: Triaxialität des Spannungstensors

$$R_v = \frac{2}{3} \cdot (1 + \nu) + 3 \cdot (1 - 2\nu) \cdot \left(\frac{\sigma_h}{\sigma_{\text{eqv}}} \right)^2 \quad (2.2)$$

mit σ_h als der hydrostatischen Spannung, σ_{eqv} als äquivalente Spannung nach von Mises und ν als Poissonzahl. Da Kriechvorgänge in dem Anwendungsfall keine Rolle spielen, wird in Formel (2.1) lediglich der Teil benutzt, der die plastische Dehnung in Relation zur Bruchdehnung bringt. Das Schädigungsinkrement wird für jedes Element über die Mittelung der nodalen Werte für die äquivalente plastische Dehnung berechnet. Die akkumulierte Schädigung berechnet sich insgesamt nach:

$$D = \sum_{i=1}^{\text{ldstep}} \Delta D_i \quad (2.3)$$

Elementschädigung den Wert $D = 1$ erreicht, wird das Element gelöscht (vgl. /5/ Abschnitt "element birth and death") und auf diese Weise der Riss an der Stelle um die Länge dieses Elementes geöffnet.

3. Rechnungen und Ergebnisse

3.1 Testrechnung

Das für die Testrechnungen des FE-Modells benutzte Material ist ein 10CrMo9-10 Stahl, für den die entsprechende experimentelle Vergleichsdaten zur Verfügung standen. Für dieses Material wird im folgenden die Materialcodebezeichnung #24 verwendet. Der Werkstoff für die modellierten Teile der Belastungseinrichtung ist der ausscheidungshärtbare Edelstahl Armco 17-4PH in der Kondition H900. In der Tabelle1 sind die für die Rechnungen relevanten Materialeigenschaften aufgelistet und im Bild 4 sind die Spannungs-Dehnungs-Kurven für das Probenmaterial dargestellt. Dabei wurde die Spannungs-Dehnungs-Kurve für eine Zugprobe bestimmt und entsprechend in die für die Rechnung erforderliche wahre Spannungs-Dehnungs-Kurve aus den gemessenen Werten nach den folgenden Formeln berechnet:

$$\begin{aligned}\sigma_{true} &= \sigma_{eng} (1 + \varepsilon_{eng}) \\ \varepsilon_{true} &= \ln(1 + \varepsilon_{eng})\end{aligned}\tag{3.1}$$

mit σ_{true} und ε_{true} der wahren Spannung, bzw. wahren Dehnung sowie σ_{eng} und ε_{eng} der mit einer Zugprobe bestimmten technischen Spannung, bzw. Dehnung. Die Gleichung 3.1 gilt bis zur Gleichmaßdehnung (bis zum Beginn der Einschnürung). Für Dehnungswerte größer als die Gleichmaßdehnung wurde die $\sigma_{true} - \varepsilon_{true}$ - Kurve linear verlängert bis zum Bruchpunkt (σ_{frac} , ε_{frac}). Die wahre Bruchdehnung und die wahre Bruchspannung werden wie folgt berechnet:

$$\begin{aligned}\sigma_{frac} &= \frac{F_{frac}}{A_{frac}} \\ \varepsilon_{frac} &= 2 \ln \left(\frac{d_o}{d_{frac}} \right)\end{aligned}\tag{3.2}$$

wobei F_{frac} der Maximalwert der Zugkraft und A_{frac} die Fläche beim Bruch, sowie d_o der Nenndurchmesser der Zugprobe und d_{frac} der Bruchdurchmesser sind.

	Armco 14-4PH	Material #24
Dichte ρ [kg m ⁻³]	7810	7810
Elastizitätsmodul E [GPa]	200.0	208.9
Poissonzahl ν	0.3	0.3
Bruchdehnung $\varepsilon_{\text{frac}}$ [%]	---	135
Streckgrenze $R_{P 0.2}$ [MPa]	---	610

Tabelle 1: Materialeigenschaften des verwendeten Probenstahls

Innerhalb einer Testrechnung wurde das Modell mit einer quasistatischen Last beaufschlagt. In 159 Lastschritten wurde durch die Verschiebung der Knoten, welche den Kontakt zum niederdrückenden Stempel der Belastungseinrichtung simulieren, eine Durchbiegung der Probe bis 3.7 mm nachgerechnet. Ausgangszustand für die Rechnung war eine Probe mit einem anfänglichen Risstiefen-Probendicken-Verhältnis $a/W = 0.5$, d.h. die Probe enthielt einem vorgeprägten Anriss mit der Tiefe 5.0 mm.

In den Bildern 5 bis 7 sind die Vergleichsspannungen, die plastische Dehnung sowie die Schädigung der Probe bei 4 ausgewählten Lastschritten dargestellt. Bei Lastschritt 2 (Durchbiegung $dy = 0.2$ mm) erreicht die Vergleichsspannung im Bereich der Rissfront, aber auch im Bereich der Lastaufbringung Werte von über 600 MPa. Das Maximum von 645 MPa bildet sich am Schnittpunkt von Rissfront und Seitkerbe heraus. Dort stellt man auch den Maximalwert für die plastische Vergleichsdehnung (3.7%) und die Schädigung (0.10) fest, allerdings bei Werten, die noch zu keiner Rissöffnung führen. Erst bei Lastschritt 6 (Durchbiegung $dy = 0.67$ mm) wird im Modell das erste Element gelöscht. In diesem Gebiet übersteigt die Vergleichsspannung den Wert 770 Mpa und die plastische Vergleichsdehnung liegt bei 20%. Allerdings erreicht der Schädigungsparameter für dieses Element den Wert 1.0, so dass dieses aus der Rechnung gelöscht und somit ein Öffnen des Risses an dieser Stelle simuliert wird.

Mit zunehmender Last setzt sich dieser Vorgang fort. Bei Lastschritt 49 (Durchbiegung $dy = 1.53$ mm) haben sich bereits mehrere Elementreihen des Ligaments geöffnet, so dass ein Rissfortschritt von ca. 0.45 mm vorliegt. Die Vergleichsspannung erreicht hier Werte um etwa 900 MPa und die plastische Vergleichsdehnung von 40%. Im letzten berechneten Lastfall mit der Durchbiegung $dy = 3.73$ mm hat sich der Riss um $\Delta a = 1.8$ mm geöffnet. Vergleichsspannung und plastische Vergleichsdehnung weisen Maximalwerte von über 920 MPa bzw. 46% auf.

Das Bild 8 zeigt den Vergleich zwischen mit dem FE-Modell berechneten Risswachstum Δa und experimentell bestimmten Werten in Abhängigkeit von der Durchbiegung der Probe. In dieser Darstellung wird eine gute Übereinstimmung sichtbar. Lediglich im unteren Wertebereich für die Durchbiegung ergibt sich eine Abweichung. Diese Diskrepanz lässt sich mit der experimentellen Auswertemethode erklären, bei der das Risswachstums Δa über das J-Integral bestimmt. Das hat zur Folge, dass bereits das Aufweiten des Risses (Blunting-Effekt) wirksam wird und rein rechnerisch als geringe Rissöffnung wiedergegeben wird. Das FE-Modell andererseits interpretiert diesen Blunting-Effekt nicht als Risswachstum. Das Risswachstum wird von dem bereits beschriebenen Schädigungsmodell gesteuert und wird dementsprechend aus der Anzahl und der Geometrie der gelöschten Elemente bestimmt.

3.2 Simulation des Compliance-Teilentlastungsversuches

In weiteren Rechnungen wurden die Lastschritte so gewählt, dass die Kraft-COD-Kurven eines Compliance-Teilentlastungsversuches nachgerechnet werden konnten (vgl. Bilder 9 und 10). Bei dieser Rechnung wurde als Last die schrittweise Verschiebung der Knotenreihen (Kraftknoten) vorgegeben, welche den Kontakt zum Druckstempel repräsentieren. Entsprechend dem Teilentlastungsversuch wurden mehrere Entlastungsschritte nachgebildet, die den Ausgangspunkt für die Bestimmung der Compliance darstellen. Ermittelt wird die COD – Compliance, welche aus dem Verhältnis von COD-Wert und der für die Verschiebungen der Kraftknoten erforderlichen Kräfte berechnet wird. Die für eine bestimmte Durchbiegung erforderliche Kraft wird dabei über die Summierung der Reaktionskräfte an den Kraftknoten bestimmt.

Gemäß /6-9/ wird die Risttiefe a_i nach folgenden Beziehungen aus der Compliance C berechnet:

$$a_i = W \cdot \left(0.999748 - 3.9503 \cdot u + 2.9821 \cdot u^2 - 3.21408 \cdot u^3 + 51.5156 \cdot u^4 - 113.031 \cdot u^5 \right) \quad (3.3)$$

$$\text{mit } u = \frac{1}{\left[\frac{B_e \cdot W \cdot E \cdot C_i}{S/4} \right]^{1/2} + 1}$$

wobei B_e die effektive Breite der gekerbten Probe, E den Elastizitätsmodul, S der Spannweite der Probenauflage und W die Probendicke darstellt.

Mit dem FE-Modell der Charpy-Probe ist man nun in der Lage, die Abhängigkeit des Risswachstums von der Durchbiegung der Probe in zwei unabhängigen Verfahren zu bestimmen:

- Einmal direkt durch die Auszählung der geschädigten Elemente (Schädigung $D \geq 1$), deren Flächensumme in der Rissebene den Rissfortschritt angibt. Bild 11 zeigt das Elementschema und veranschaulicht das Öffnen des Risses in der Ligamentebene des FE-Modells. Dabei wird die zeitliche Reihenfolge des Löschens der Elemente dargestellt.
- zum anderen die Berechnung aus der COD-Compliance C nach dem ASTM-Standard (nach Gleichung (3.3)).

Das Bild 12 zeigt einen Vergleich dieser beiden Methoden zur Rissfortschrittsbestimmung. Dargestellt wird die Abhängigkeit des Risswachstums Δa von der Durchbiegung d_y der Probe. Man kann feststellen, dass mit zunehmender Durchbiegung eine größer werdende Abweichung der jeweils ermittelten Werte für das Risswachstum auftritt. Eine solche Fehlerabweichung an 3-Punktbiegeproben wurde auch bei der experimentellen Risslängenbestimmung mittels der Compliance-Methode festgestellt /10/. In Bild 12 ist daher auch ein möglicher Korrekturansatz (nach Steenkamp /1/) dargestellt, der eine Verbesserung der Übereinstimmung bewirkt.

Einen weiteren Unterschied zwischen den beiden Methoden kann man im Bereich kleiner Durchbiegungen feststellen. Bei Durchbiegungen $dy < 0.8$ mm findet noch keine Rissöffnung statt, jedoch nimmt die Steifigkeit der Probe geringfügig zu. Entsprechend verringert sich die Compliance, wodurch bei der formalen Anwendung der Gl. 3.3 eine Verringerung der Risstiefe vorgetäuscht wird.

4. Zusammenfassung

Experimentelle Bruchvorgänge mit 3-Punktbiegeproben können mit einem FE-Modell simuliert werden. Dieses Modell berücksichtigt plastisch-elastisches Materialverhalten und kann mittels eines schädigungsgesteuerten Rissöffnungsmodell den Rissfortschritt bei Biegeversuchen nachbilden.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Das gewählte Schädigungsmodell eines dehnungsbasierenden Bruchkriteriums ist geeignet das Risswachstum in geeigneter Weise abzubilden.
- Für kleine Durchbiegungen ergeben sich hinsichtlich der berechneten Rissöffnung Abweichungen zu experimentellen Befunden aufgrund des Blunting-Effektes.
- Eine systematische Abweichung bei der experimentellen Risslängenbestimmung mit der Compliance-Methode bei 3-Punktbiegeproben nach den ASTM-Standard konnte mit dem theoretischen Modell bestätigt werden.

5. Literatur

- /1/ Steenkamp, P.A.J.M., Fracture Mechanics 18th Symposium, ASTM STP 945, Philadelphia, 1988, p.583-610
- /2/ Altstadt, E.; Moessner, Th., Wissenschaftlich-Technische Berichte FZR 296, 2000

- /3/ Gurson, A.L. Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part 1 - Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media. Transaction of ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, **1977**,3
- /4/ Needleman, A.; Tvergaard, V.: An analysis of Ductile Rupture in Notched Bars. Journal of Mechanics and Physics of Solids, Vol. 32, **1984**, pp 461-490
- /5/ ANSYS User's Manual - Analysis Guide (Rev. 5.5) ANSYS, Inc. **1998**
- /6/ ASTM E 1921-97, American Society for Testing and Materials **1998**, Vol.03.01
- /7/ ASTM E 1737-96, American Society for Testing and Materials **1996**, Vol.03.01
- /8/ ISO/DIS 12135, Draft International Standard ISO/TC 164/SC4, International Organisation for Standardisation **1998**
- /9/ ASTM Standard E1820-01: Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, ASTM **2001**
- /10/ Dzugan, J.:Crack lengths calculation by the unloading compliance technique for Charpy size specimen. Wissenschaftlich-Technische Berichte FZR 385, **2003**

6. Bildanhang mit Abbildungsverzeichnis

- Bild 1:** Charpy-Probe mit vorgeprägtem Riss und Seitkerbe in der Belastungseinrichtung
- Bild 2:** FE-Modell (Viertelmodell) der Charpy-Probe mit Rolle und dem Auflager der Belastungseinrichtung
- Bild 3:** FE-Modell mit Draufsicht auf die Rissfläche und das Ligament
- Bild 4:** Spannungs-Dehnungs-Kurve des Materials #24
- Bild 5:** Die Vergleichsspannung an einer Charpy-Probe bei 4 verschiedenen Lastschritten
- Bild 6:** Die plastische Dehnung an einer Charpy-Probe bei 4 verschiedenen Lastschritten
- Bild 7:** Schädigung und Risswachstum an einer Charpy-Probe bei 4 verschiedenen Lastschritten
- Bild 8:** Experimentelles und theoretisches Risswachstum in Abhängigkeit von der Durchbiegung einer Charpy-Probe
- Bild 9:** Experimentelle Kraft-COD-Kurve eines Compliance-Teilentlastungsversuches
- Bild 10:** Die mittels FE-Rechnung simulierte Kraft-COD-Kurve des Compliance-Teilentlastungsversuches
- Bild 11:** Öffnungsschema des Risses in der Ligamentebene
- Bild 12:** Der Vergleich der Risstiefenbestimmung nach der Compliance-Methode und der direkten Elementauszählung im FE-Modell. Korrekturansatz nach Steenkamp /1/

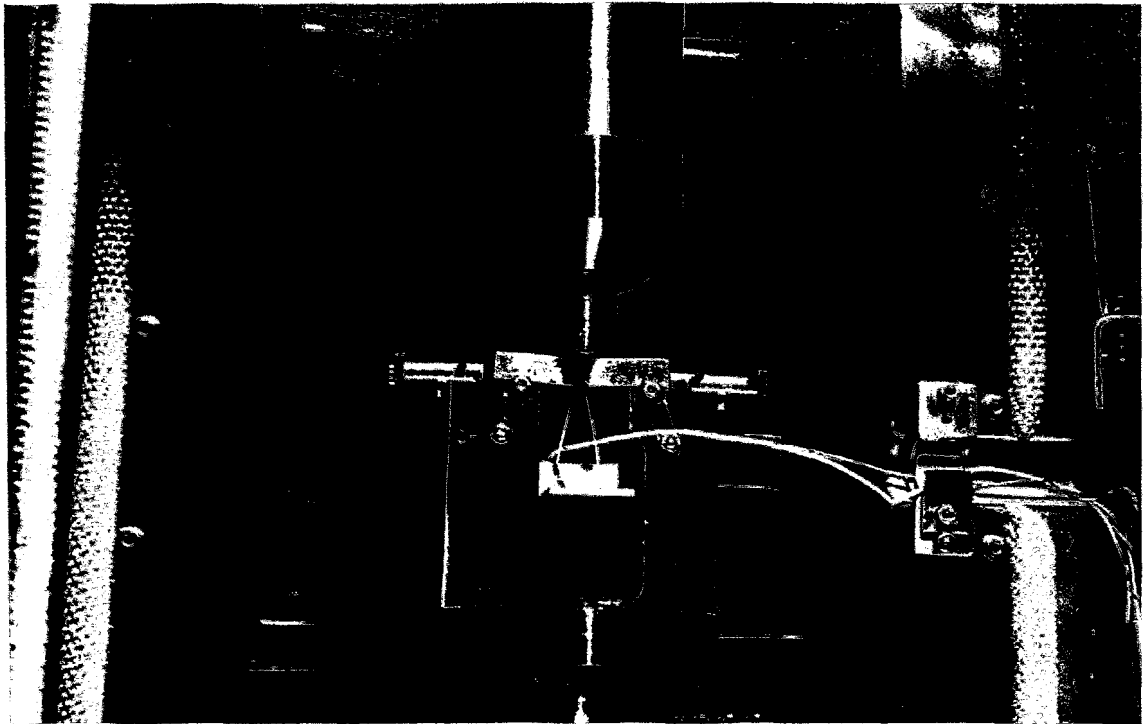


Bild 1: Charpy-Probe mit vorgeprägtem Riss und Seitkerbe in der Belastungseinrichtung.

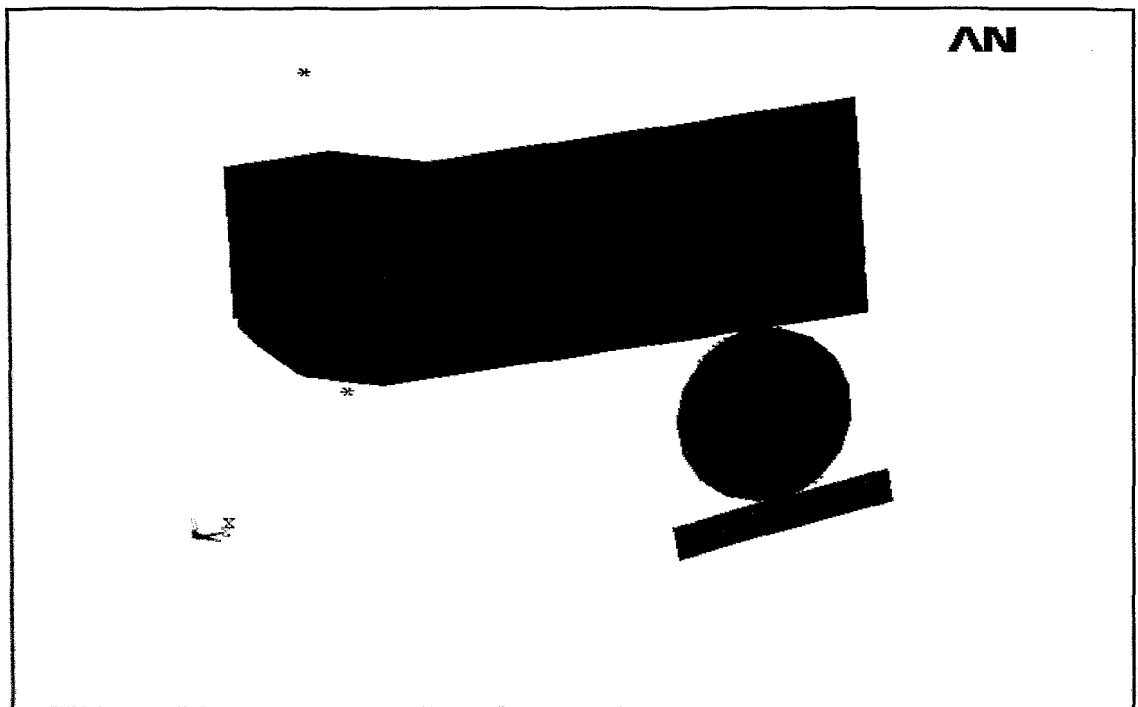


Bild 2: FE-Modell (Viertelmodell) der Charpy-Probe mit Rolle und dem Auflager der Belastungseinrichtung.

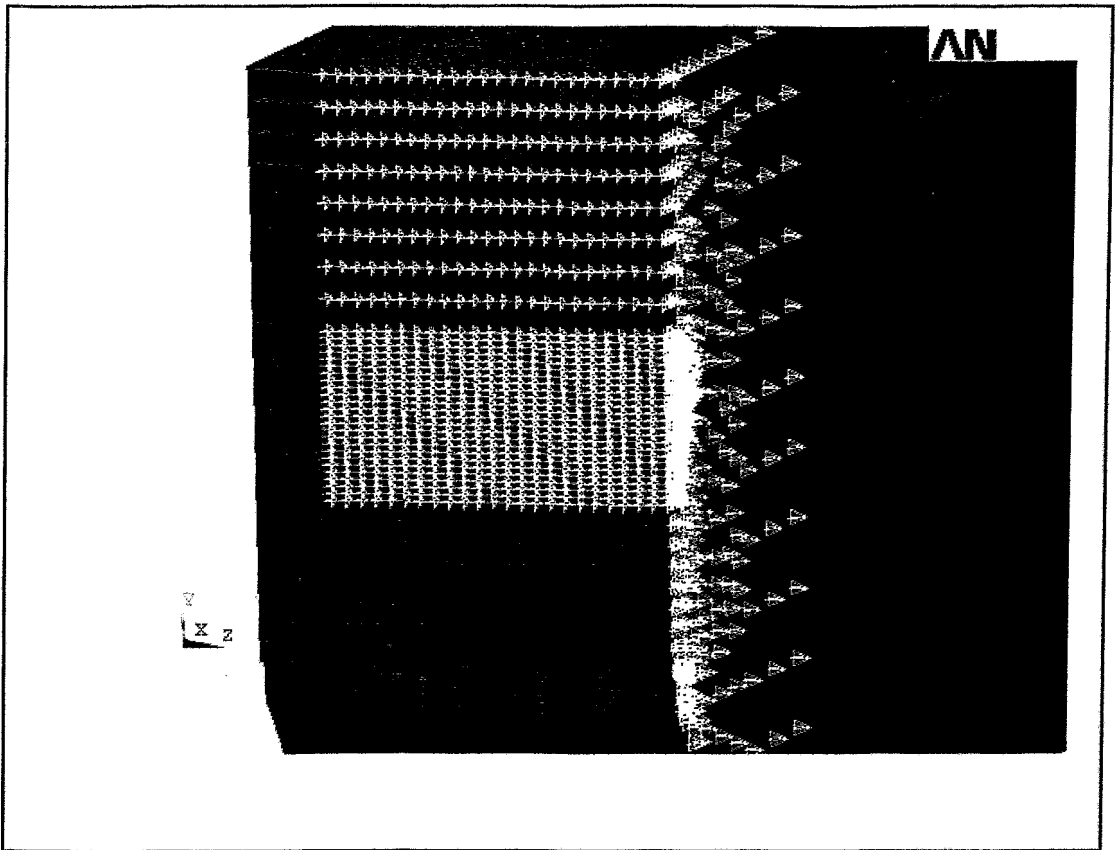


Bild 3: FE-Modell mit Draufsicht auf die Rissfläche und das Ligament (Symmetrie- und Randbedingungen gelb markiert).

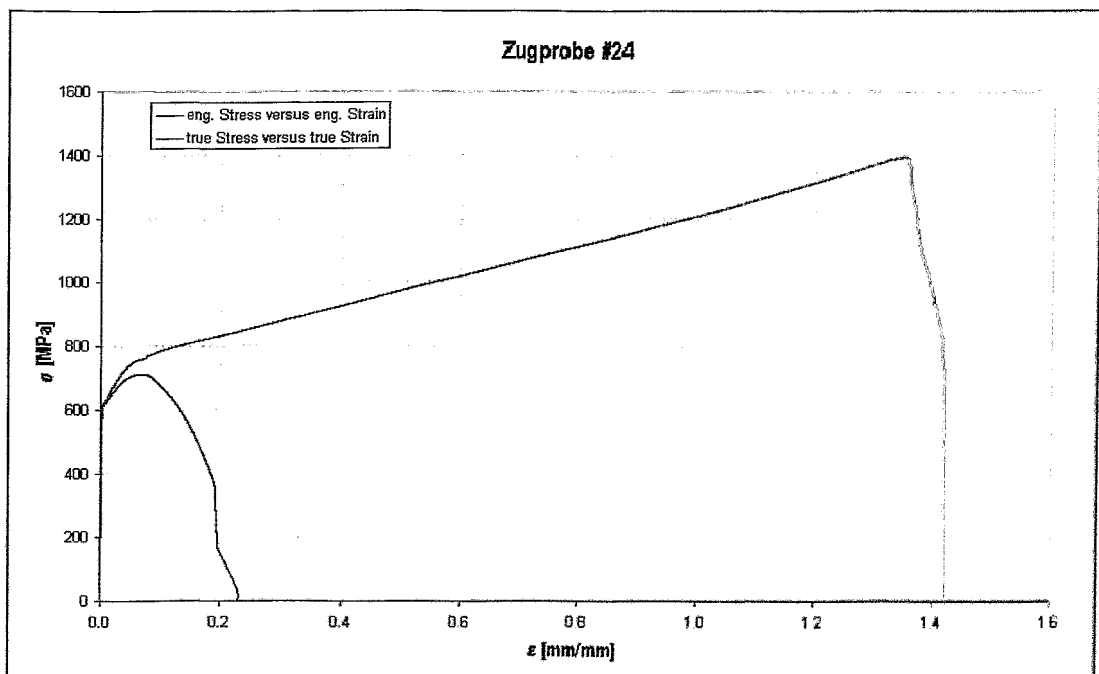


Bild 4: Spannungs-Dehnungs-Kurve des Materials #24.

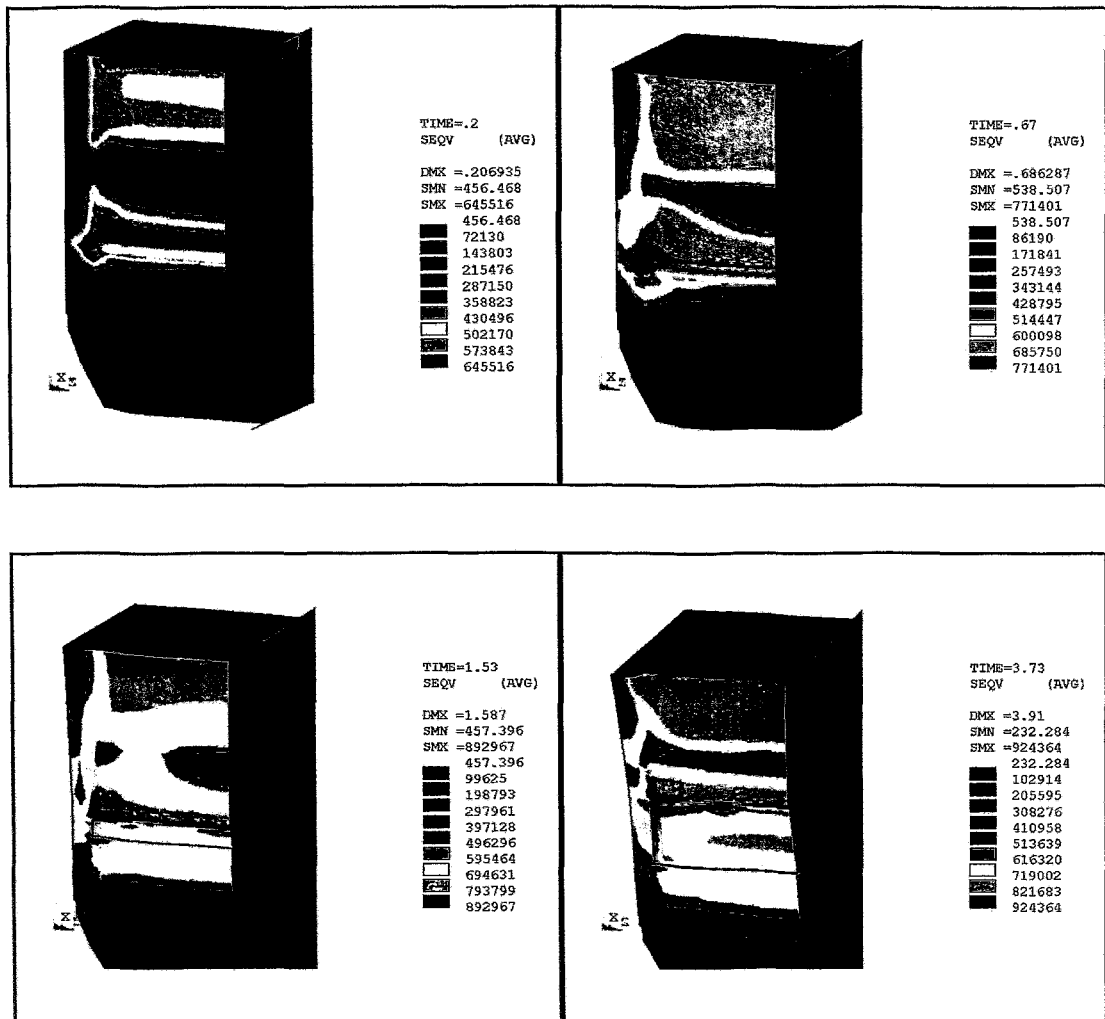


Bild 5: Die Vergleichsspannung an einer Charpy-Probe bei 4 verschiedenen Lastschritten:

- Lastschritt 2: Durchbiegung $dy=0.20$ mm
- Lastschritt 6: Durchbiegung $dy=0.67$ mm
- Lastschritt 49: Durchbiegung $dy=1.53$ mm
- Lastschritt 159: Durchbiegung $dy=3.73$ mm

Die Farbskalierung bezeichnet die Vergleichsspannung in kPa. Die schwarzen Linien in der Rissebene markieren die gelöschten Elemente und kennzeichnen den Rissfortschritt.

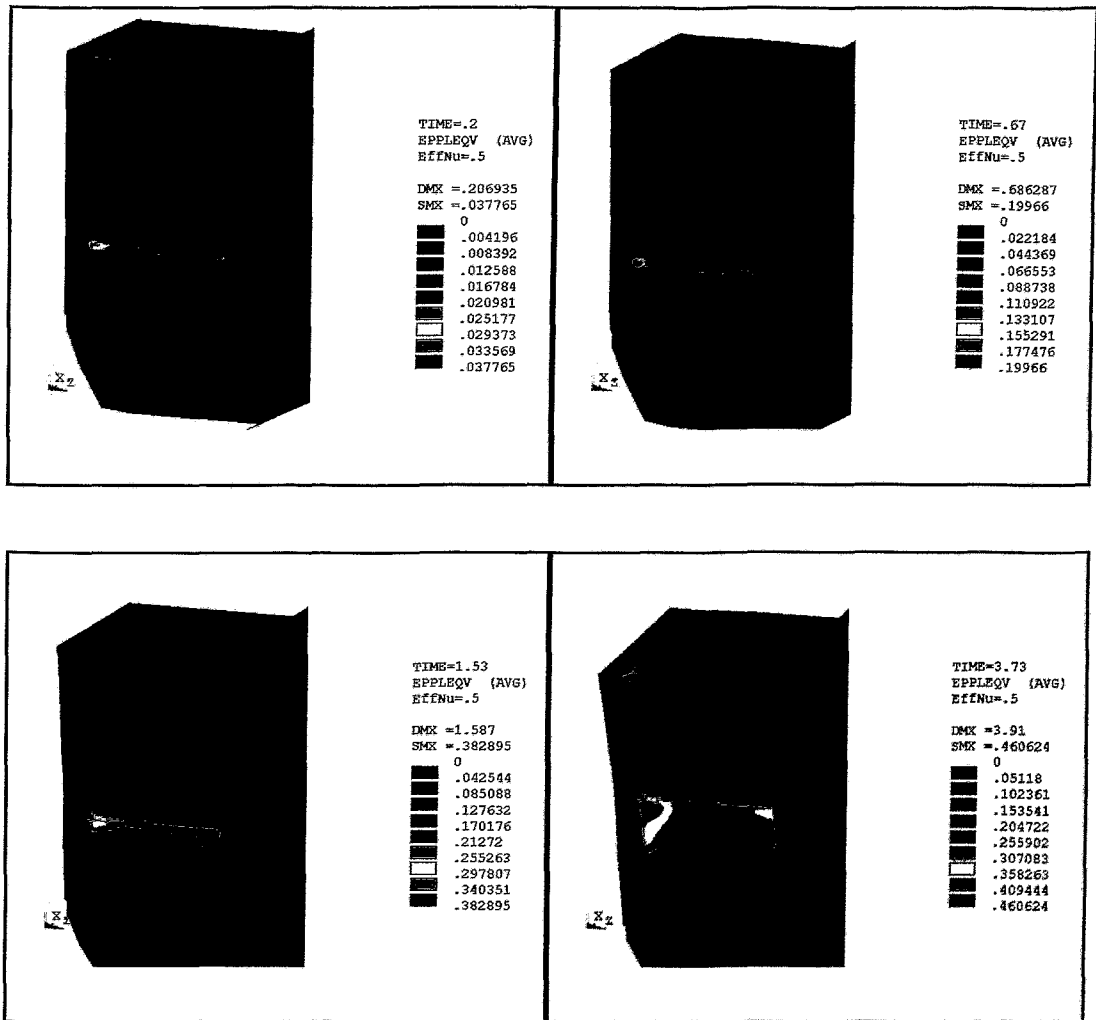


Bild 6: Die plastische Dehnung an einer Charpy-Probe bei 4 verschiedenen Lastschritten:

- Lastschritt 2: Durchbiegung $dy=0.20$ mm
- Lastschritt 6: Durchbiegung $dy=0.67$ mm
- Lastschritt 49: Durchbiegung $dy=1.53$ mm
- Lastschritt 159: Durchbiegung $dy=3.73$ mm

Die Farbskalierung bezeichnet die plastische Dehnung. Die schwarzen Linien in der Rissebene markieren die gelöschten Elemente und kennzeichnen den Rissfortschritt.

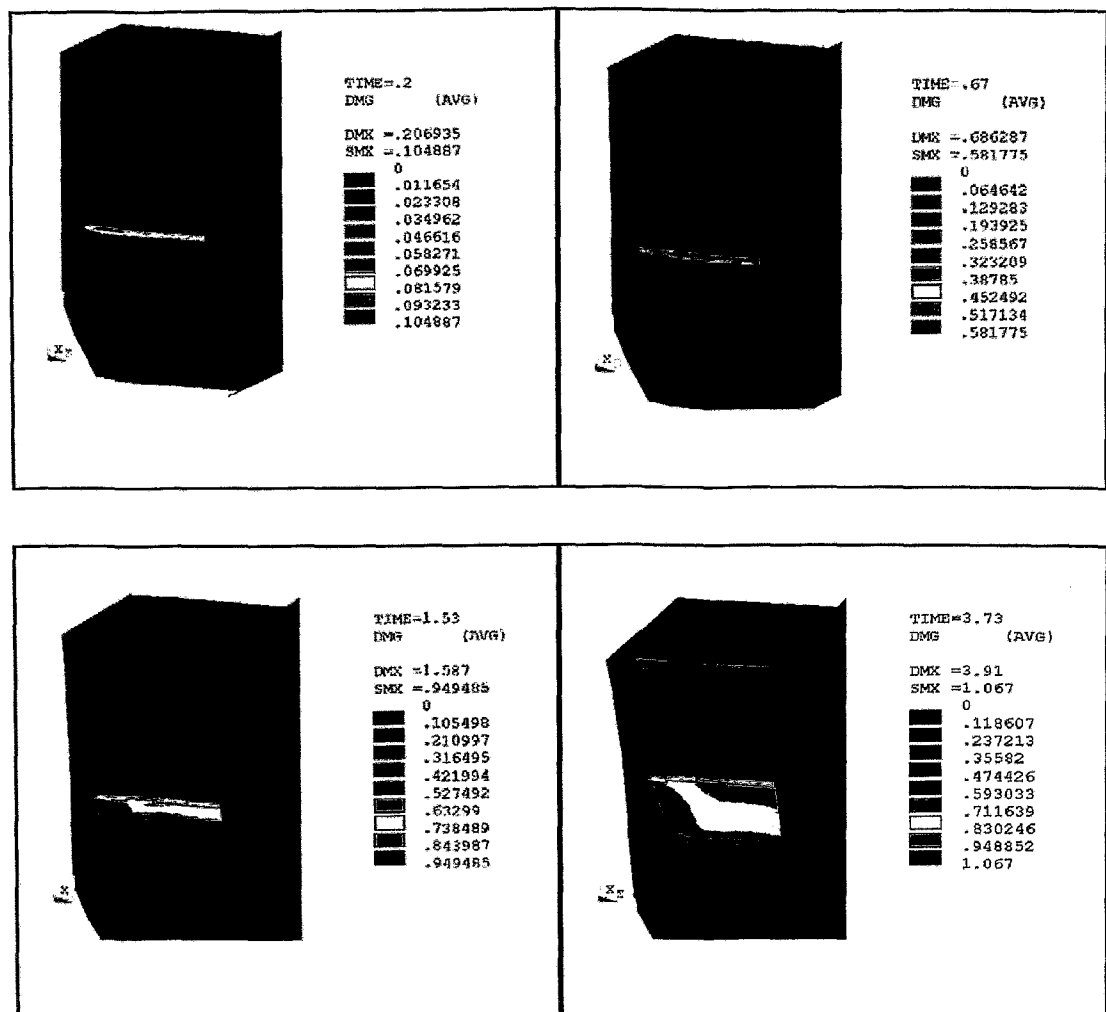


Bild 7: Schädigung und Risswachstum an einer Charpy-Probe bei 4 verschiedenen Lastschritten:

- Lastschritt 2: Durchbiegung $dy=0.20$ mm
- Lastschritt 6: Durchbiegung $dy=0.67$ mm
- Lastschritt 49: Durchbiegung $dy=1.53$ mm
- Lastschritt 159: Durchbiegung $dy=3.73$ mm

Die Farbskalierung bezeichnet den Damageparameter D . Die schwarzen Linien in der Rissebene markieren die gelöschten Elemente und kennzeichnen den Rissfortschritt.

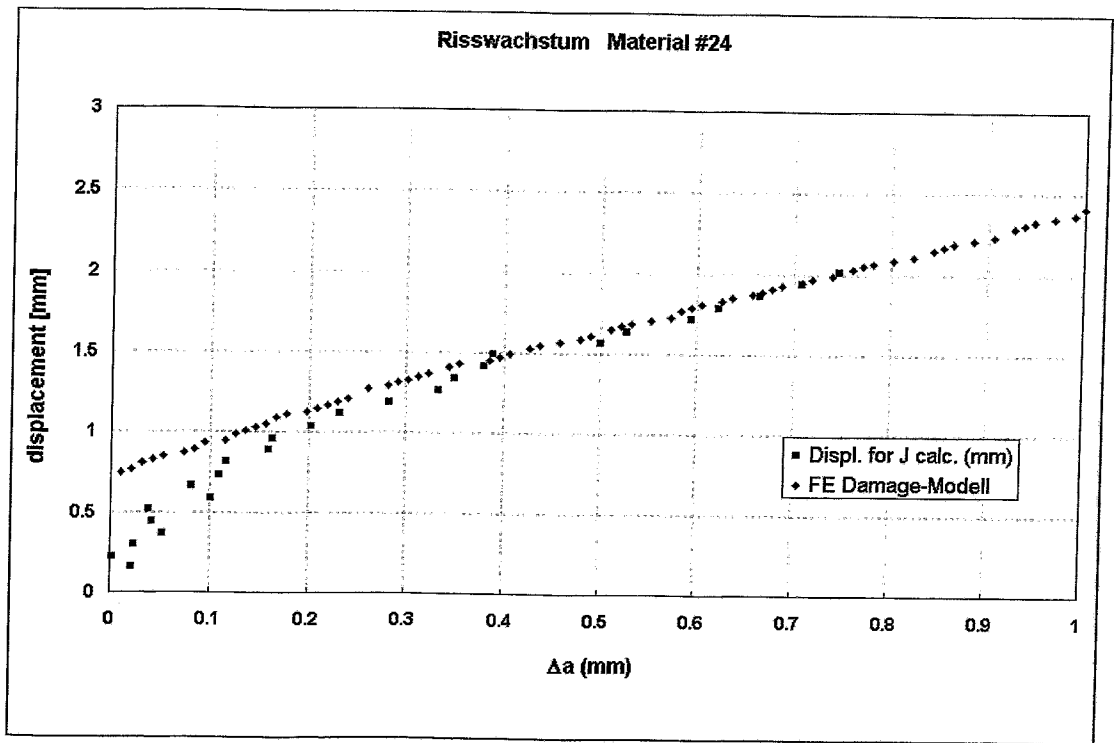


Bild 8: Experimentelles (Markierung blau und rot) und theoretisches Risswachstum in Abhängigkeit von der Durchbiegung einer Charpy-Probe.

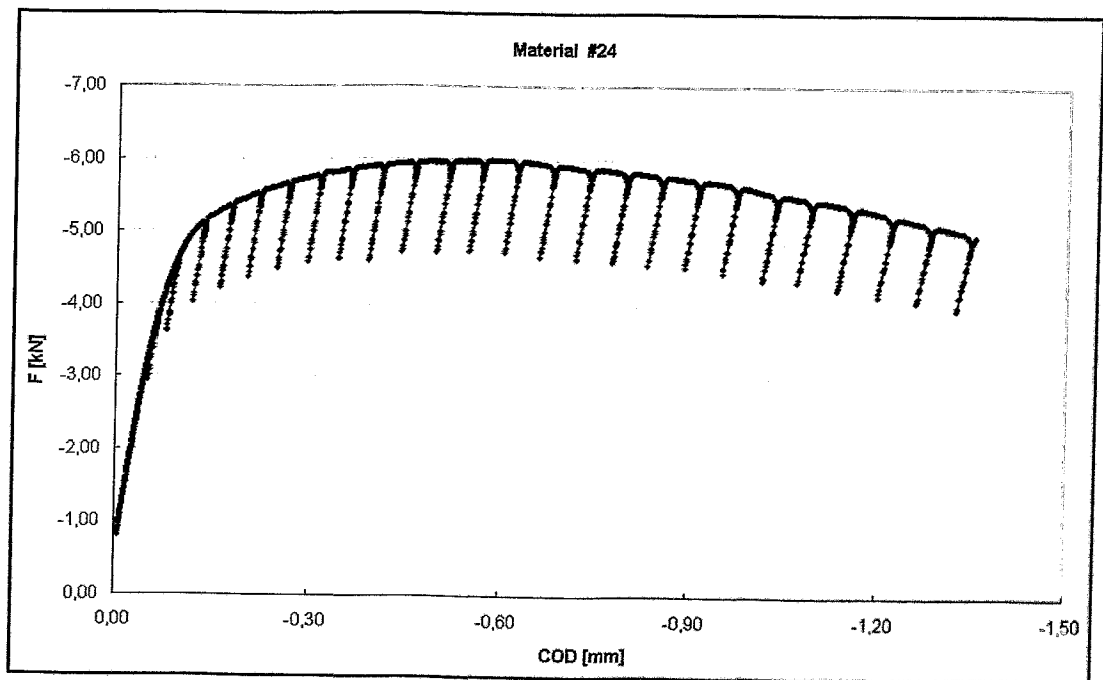


Bild 9: Experimentelle Kraft-COD-Kurve eines Compliance-Teilentlastungsversuches.

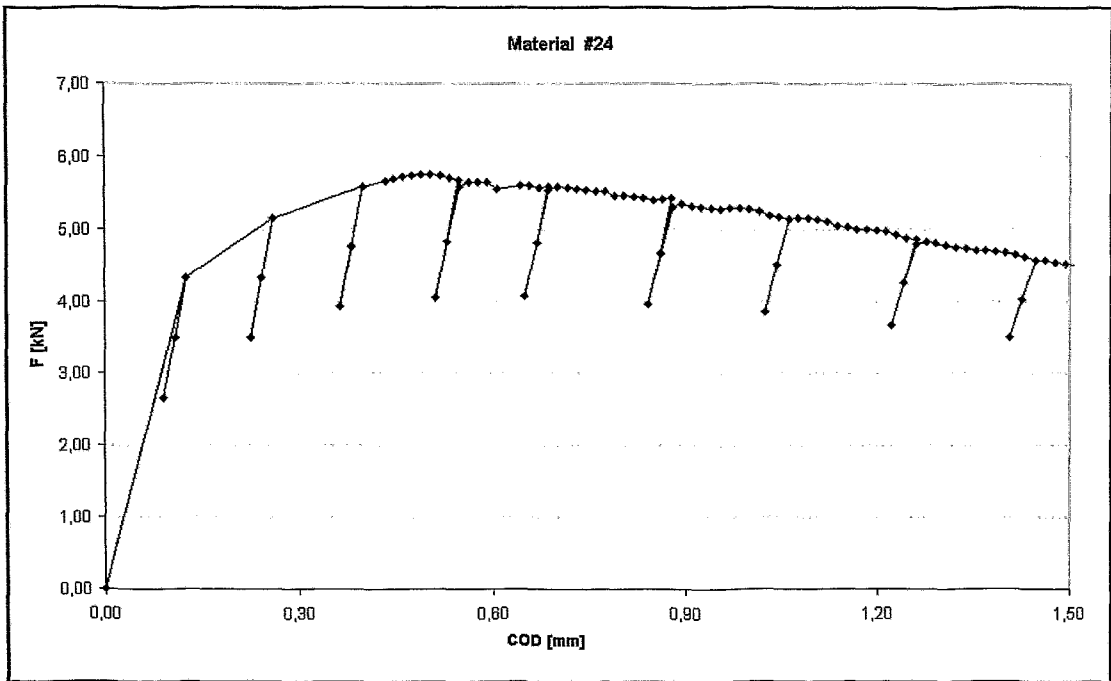


Bild 10: Die mittels FE-Rechnung simulierte Kraft-COD-Kurve des Compliance-Teilbelastungsversuches

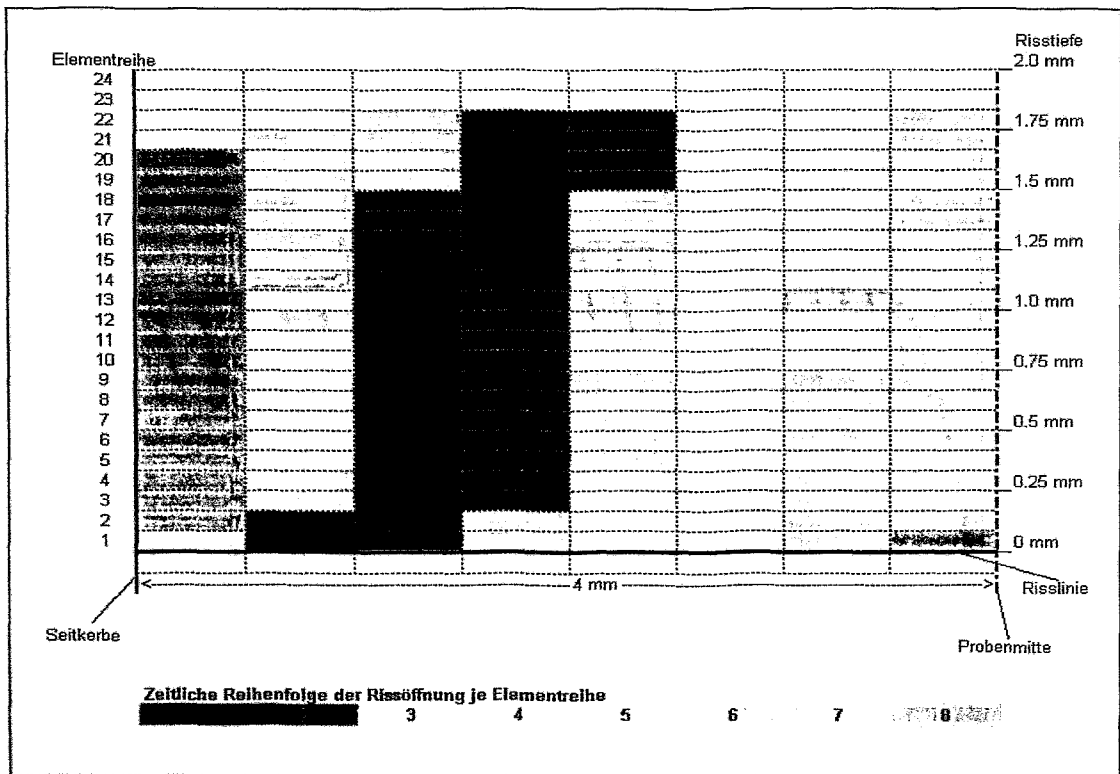


Bild 11: Öffnungsschema des Risses in der Ligamentebene

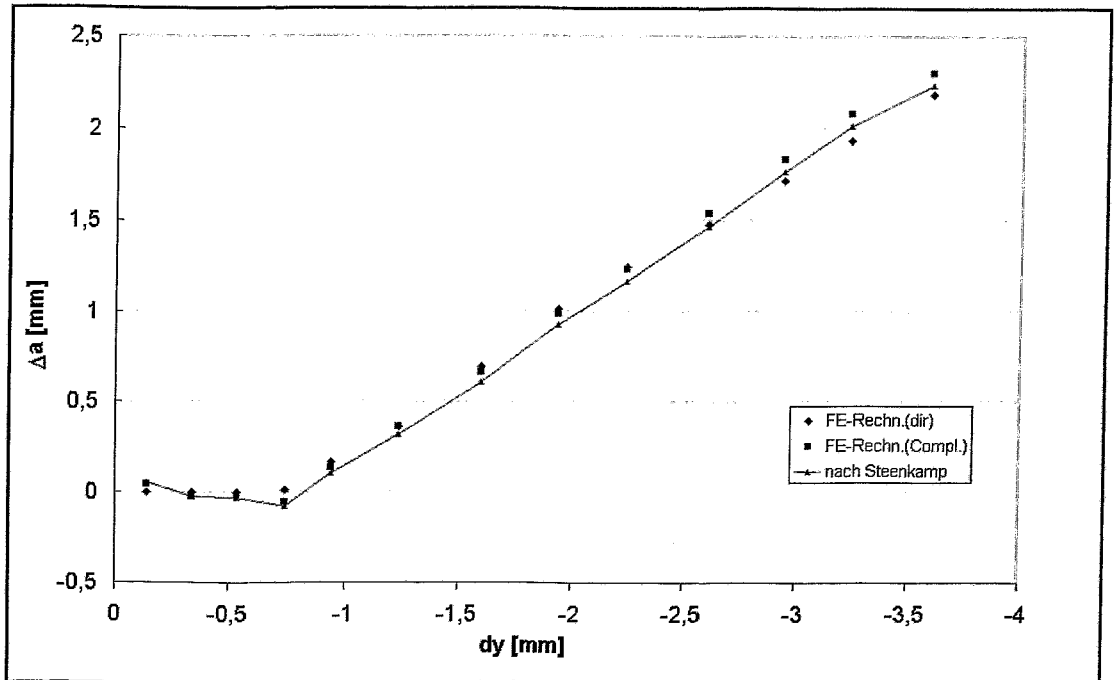


Bild 12: Der Vergleich der Risstiefenbestimmung nach der Compliance-Methode und der direkten Elementauszählung im FE-Modell. Korrekturansatz nach Steenkamp /1/.