

# BESTIMMUNG VON VERFORMUNGS- UND VERSAGENS-EIGENSCHAFTEN DUKTILER WERKSTOFFE AUS DEM SMALL PUNCH TEST

M. Abendroth\*, M. Kuna\*

\*) TU Bergakademie Freiberg, Institut für Mechanik und Fluidodynamik

**Zusammenfassung:** Der Small Punch Test (SPT) liefert eine charakteristische Kraft-Verschiebungs-Kurve (F-u-Kurve), die Informationen über das Verformungs- und Versagensverhalten des getesteten Werkstoffs enthält. Diese F-u-Kurve wird an ein Neuronales Netz übergeben, das mit simulierten F-u-Kurven des SPT und den dazugehörigen Materialparametern trainiert wurde. Das im Rahmen der FEM simulierte Materialverhalten beruht auf dem schädigungsmechanischen Gesetz von GURSON, TVERGAARD und NEEDLEMAN. Im Laufe des Trainingsprozesses entwickelt das neuronale Netz die inverse Funktion für die Abhängigkeit der Materialparameter von der Form der F-u-Kurve. Mit dieser Technik wurden Materialparameter für duktile Werkstoffe identifiziert und mit Simulationen von Zugversuchen an gekerbten Rundzugproben verifiziert.

**Schlagworte:** Small Punch Test, Neuronale Netze, Schädigungsmechanik, Duktiler Bruch, Finite Elemente Methode

## DETERMINATION OF DEFORMATION AND FAILURE PROPERTIES OF DUCTILE MATERIALS BY MEANS OF THE SMALL PUNCH TEST

**Abstract:** The experimental method of the small punch test is used to determine the material response under loading. The resulting load displacement curve is transferred to a neural network, which is trained using load displacement curves generated by finite element simulations of the small punch test and the corresponding material parameters. The simulated material behaviour of the specimen is based on the ductile elastic plastic damage theory of GURSON, TVERGAARD and NEEDLEMAN. During a training process the neural network generates an approximated function for the inverse problem relating the material parameters to the shape of the load displacement curve of the small punch test. This technique was tested for different materials (ductile steels). The identified parameters are verified by testing and simulating notched tensile specimens.

**Keywords:** small punch test, neural network, damage, ductile fracture, finite elements

### 1 Einleitung

Die Veränderungen des mechanischen Werkstoffverhaltens in technischen Anlagen durch Alterung, Versprödung, betriebliche Beanspruchungen u.ä. erfordern eine in-situ Überwachung des Werkstoffzustandes. Um die Beschädigung der zu

überwachenden Anlagen durch die Entnahme von Probenmaterial möglichst gering zu halten, ist die Verwendung von Kleinstproben vorteilhaft. Beim Small Punch Test (SPT) [1, 4, 6] wird eine kleine scheibenförmige Probe ( $\varnothing 8 \times 0.5$  mm) in einem Tiefziehversuch bis zum Versagen belastet. Dieser Versuch liefert als Messergebnis eine Kraft-Verschiebungs-Kurve (F-u-Kurve), welche Informationen über das elastisch-plastische Verformungsverhalten sowie die Festigkeitseigenschaften des getesteten Materials enthält. Ziel der laufenden Arbeiten ist es, das in der Verformungskurve des SPT liegende Informationspotential über die elastoplastischen und schädigungsmechanischen Materialeigenschaften vollständig zu erschließen und somit diesen Kleinstprobenversuch zur Ermittlung der relevanten Materialparameter (wahre Fließkurve und Schädigungskennwerte) zu qualifizieren. Der Lösungsweg für diese Parameteridentifikation besteht in der numerischen Simulation des SPT mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente (FEM) unter Verwendung moderner elastoplastischer schädigungsmechanischer Materialmodelle.

## 2 Experimentelle Methoden

Die SPT-Apparatur (Bild 1) besteht aus einem verschraubbaren Gehäuse (7 – Unterteil, 3 – Oberteil). Das Unterteil dient als Aufnahme für die Matrize (9) und den Niederhalter (4). Die Probe (8) wird zwischen Matrize und Niederhalter geklemmt, indem beide Gehäuseteile fest verschraubt werden. Der Stempel (2) wird im Niederhalter geführt, so dass er die Probe zentrisch deformieren kann. An einem Klemmring (10) ist ein Halter (6) für den induktiven Wegaufnehmer (5) befestigt. Der Wegaufnehmer ist parallel zum Stempel angeordnet, so dass der

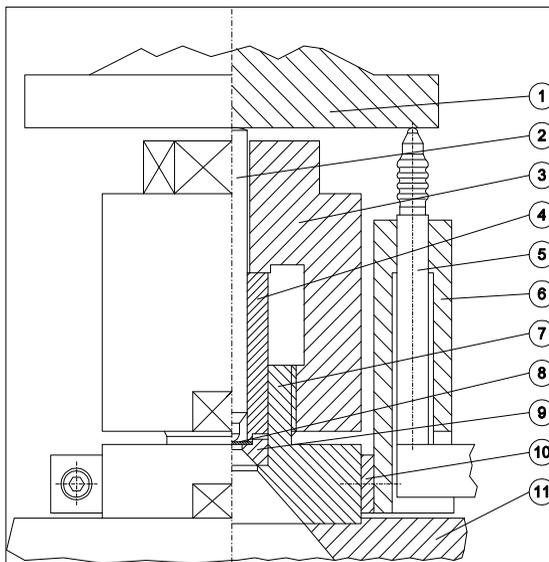
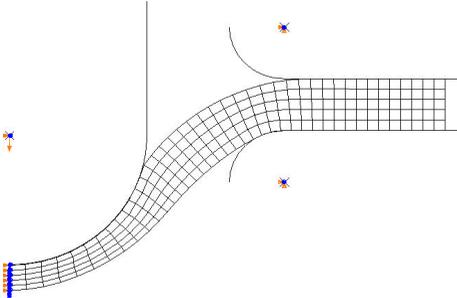


Bild 1: SPT-Apparatur

Weg  $u$  des Druckstempels (1) unabhängig von den elastischen Deformationen der Prüfmaschine gemessen wird. Die gesamte kompakte SPT-Apparatur sitzt zentriert auf der Grundplatte (11).

Für Verifikationszwecke werden auch Zugversuche an gekerbten Rundzugproben aus den Werkstoffen 10Mn-MoNi55 und 18Ch2MFA durchgeführt. Dabei werden mit einem Videoextensometer Längs-, Querdehnung und der Kerbradius im Bereich der Einschnürung gemessen, was eine Ermittlung der wahren Spannung [3] und der Mehrachsigkeit ermöglicht.

### 3 Numerische Simulationen



**Bild 2:** FE-Netz des SPT ( $u=1.75$  mm)

Da die Versuchsgeometrie und die Belastung beim SPT axialsymmetrisch sind, lässt sich ein geometrisches Modell des SPT erstellen (Bild 2). Im FE-Modell des SPT ist die Probe mit  $40 \times 5$  axialsymmetrischen 4-Knoten-Elementen mit reduzierter Integration vernetzt. Damit haben alle Elemente die Abmessungen  $0.1 \times 0.1$  mm. Matrize, Niederhalter und Stempel sind als axialsymmetrische starre Körper modelliert und jeweils an Masterknoten gebunden, die mit Randbedingungen versehen werden können. Matrize und Niederhalter sind in allen Freiheitsgraden fixiert, der Stempel kann über eine Verschiebungsrandbedingung in vertikaler Richtung verschoben werden. Alle auftretenden Kontakte sind als Reibkontakte modelliert, wobei der Reibungskoeffizient  $m$  variabel ist. Die FEM-Analysen wurden mit ABAQUS unter Berücksichtigung großer elastisch-plastischer Deformationen vorgenommen.

Matrize und Niederhalter sind in allen Freiheitsgraden fixiert, der Stempel kann über eine Verschiebungsrandbedingung in vertikaler Richtung verschoben werden. Alle auftretenden Kontakte sind als Reibkontakte modelliert, wobei der Reibungskoeffizient  $m$  variabel ist. Die FEM-Analysen wurden mit ABAQUS unter Berücksichtigung großer elastisch-plastischer Deformationen vorgenommen.

#### 3.1 Das Materialmodell

Als Materialmodell wurde das Schädigungsmodell von GURSON, TVEERGARD UND NEEDLEMAN (GTN) verwendet (siehe [2], [5]). Dieses Materialmodell geht davon aus, dass sich im elastisch-plastischen Kontinuum kugelförmige Poren befinden, die infolge der Deformationen entstehen, wachsen und sich vereinigen können. Der Porenvolumenanteil  $f$  ist somit ein Maß für die Werkstoffschädigung. Kernstück dieses Modells ist die Fließbedingung

$$F = \left( \frac{S_V}{s_F(\mathbf{e}_{pl})} \right)^2 + 2q_1 f^* \cosh \left( \frac{3}{2} q_2 \frac{S_H}{s_F(\mathbf{e}_{pl})} \right) - (1 + q_3 f^{*2}) = 0 \quad (1)$$

wobei  $S_V = \sqrt{\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij}}$  die VON MISES-Vergleichsspannung und  $S_H = \frac{1}{3} S_{kk}$  die hydrostatische Spannung ist.  $s_F(\mathbf{e}_{pl})$  stellt die wahre Fließkurve dar, welche die Verfestigung des Matrixmaterials im Rahmen der VON MISES-Vergleichsgrößen bei isotroper Verfestigung beschreibt. Zur Beschreibung der Fließkurve wird das Potenzgesetz

$$s_F(\mathbf{e}_{pl}) = R_e \left[ \frac{\mathbf{e}_{pl}}{\mathbf{e}^*} + 1 \right]^{\frac{1}{n}} \quad \text{mit} \quad \mathbf{e}^* = \frac{\mathbf{e}_{pl}^*}{\left[ \frac{S^*}{R_e} \right]^n - 1} \quad (2)$$

verwendet. Die Fließspannung  $s_F$  ist eine Funktion der plastischen Dehnung  $\mathbf{e}_{pl}$  mit den Parametern  $R_e$ ,  $\mathbf{e}^*$  und  $n$ . Dabei lässt sich  $\mathbf{e}^*$  über ein Wertepaar von

$s^*$  und  $e_{pl}^*$  darstellen, wobei  $e_{pl}^* = 1$  und  $s^* = s_F(e_{pl} = 1)$  gesetzt wird.

$f^*$  bezeichnet den modifizierten Schädigungsparameter, der wie folgt vom Porenvolumenanteil  $f$  abhängt:

$$f^* = \begin{cases} \frac{f}{f_c + k(f - f_c)} & f \leq f_c \\ f > f_c \end{cases} \text{ mit } k = \frac{f_u^* - f_c}{f_f - f_c} \text{ wobei } f_u^* = \frac{1}{q_f} \quad (3)$$

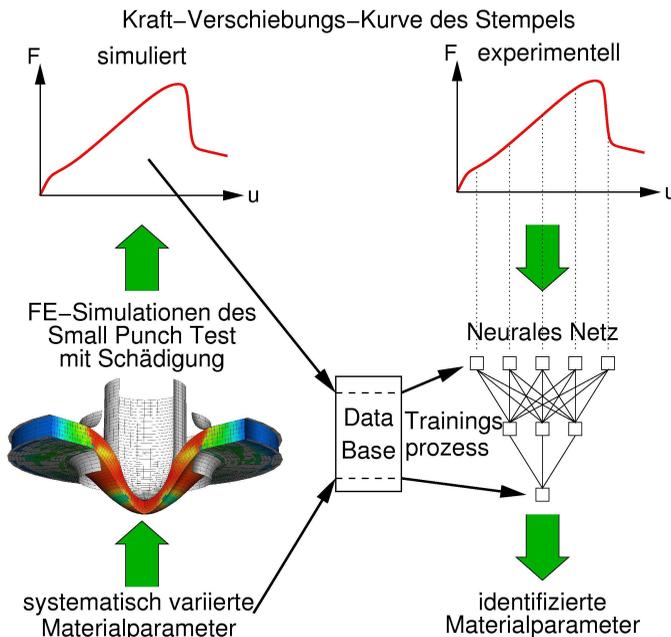
Ab dem kritischen Porenvolumenanteil  $f_c$  setzt eine beschleunigte Schädigungsentwicklung ein, wobei  $k$  den Anstieg zwischen  $f_c$  und dem Porenvolumenanteil bei makroskopischem Bruch  $f_f$  darstellt. Vervollständigt wird das Modell durch Wachstums- und Bildungsgesetze für den Porenvolumenanteil, der im Ausgangszustand den Wert  $f_0$  hat.

$$\dot{f}_{Wachstum} = (1 - f) \dot{E}_{kk}^{pl} \quad (4)$$

$$\dot{f}_{Entstehung} = A \dot{e}^{pl} \text{ mit } A = \frac{f_N}{s_N \sqrt{2p}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\bar{e}^{pl} - e_N}{s_N} \right)^2 \right] \quad (5)$$

## 4 Parameteridentifikation

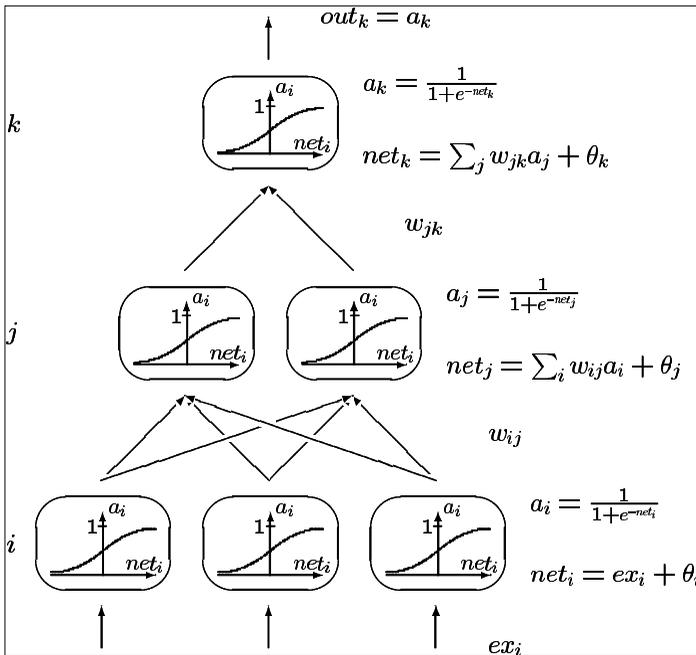
### 4.1 Strategie der Parameteridentifikation



**Bild 3:** Schema der Parameteridentifikation

Ziel der Parameteridentifikation ist es, das inverse Problem der Kontinuumsmechanik zu lösen, d.h. aus einer bekannten Lösung des Randwertproblems die Eingangsparameter (Materialdaten) zu finden. Eine Möglichkeit zur Lösung des inversen Problems ist die Verwendung von neuronalen Netzen (Bild 3). Aufgrund der vielen Materialparameter ist eine große Anzahl von Simulationen notwendig, um eine Datenbasis zu schaffen, aus der für ein breites Spektrum von duktilen Materialien die Materialparameter identifiziert werden können. Deshalb wurde ein Programm entwickelt, mit dem durch Vorgabe von Intervallen für die Materialparameter und von der Stützstellenanzahl innerhalb eines Intervalls das jeweilige Quellfile für die FE-Simulationen automatisch erzeugt wird. Die FE-Rechnungen werden automatisch gestartet und ausgewertet, relevante Daten (z.B. Kraft- und Verschiebungswerte für den Stempel) werden in geeigneten Formaten als Datenbasis für die Parameteridentifikation abgespeichert. Während des Trainingsprozesses entwickelt das Neuronale Netz aus dieser Datenbasis eine Funktion für die Abhängigkeit der Materialparameter von der Form der F-u-Kurve.

#### 4.2 Neuronale Netze



**Bild 4:** Schema eines neuronalen Netzes

Ein vorwärts betriebenes neuronales Netz (Bild 4) besteht aus mehreren Schichten von Neuronen (auch units), deren Eingangssignale  $net_i$  über eine Übertragungsfunktion  $a_i(net_i)$  zu Neuronen der darauf folgenden Schicht über gewichtete

Verbindungen  $w_{ij}$  übertragen werden. Die erste (unterste) Neuronenschicht erhält eine externe Eingabe  $ex_i$  (z.B. diskrete Werte der Kraft - Verschiebungs - Kurve des SPT). Die Werte der Übertragungsfunktion der letzten (obersten Schicht) stellen die Netzausgabe  $out_k$  dar (z.B. Materialparameter). Die Aufgabe des neuronalen Netzes besteht nun darin, einen verallgemeinerten Zusammenhang zwischen einer Netzeingabe und einer dazugehörigen Netzausgabe herzustellen. Dazu werden dem neuronalen Netz bekannte Problemlösungen zugeführt, für die man die Eingabewerte  $ex_i^{(p)}$  und Ausgabewerte  $soll_k^{(p)}$  kennt. Mit Hilfe eines Trainingsalgorithmus werden die Gewichte der Verbindungen zwischen den Neuronen variiert, so dass der Fehler der Ausgabe

$$E = \frac{1}{2} \sum_{p \in L} \sum_k (soll_k^{(p)} - out_k^{(p)})^2 \quad (6)$$

ein Minimum annimmt.  $L$  stellt die Lernaufgabe (Zuordnung der Materialparameter zu den F-u-Kurven) dar. Diese gesamte Lernaufgabe besteht aus vielen Einzelaufgaben  $p$ , die durch die Zuordnung eines Parametersatzes zu der dazugehörigen F-u-Kurve definiert sind. Die Gewichtsänderungen für die Verbindungen  $w_{ij}$  ergeben sich für die Lernepoche  $t$ :

$$D_t w_{ij} = h d_j a_i + b D_{(t-1)} w_{ij} \quad (7)$$

mit der Lernrate  $h \approx [0.1 \dots 1.0]$ , dem Moment  $b \approx [0 \dots 1]$  und dem Fehlersignal

$$d_j = \begin{cases} f'_j(net_j)(out_k - soll_k) & \text{wenn } j \text{ Ausgabeneuron} \\ f'_j(net_j) \sum_k d_k w_{jk} & \text{wenn } j \text{ kein Ausgabeneuron} \end{cases} \quad (8)$$

wobei

$$f'_j(net_j) = \frac{\partial a_j}{\partial net_j} \quad (9)$$

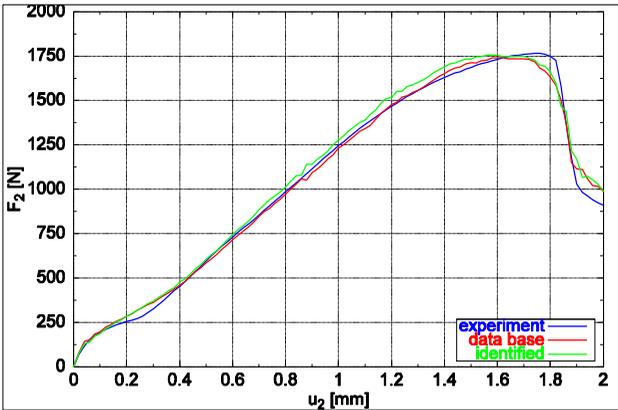
ist.

## 5 Ergebnisse

Mit einem neuronalen Netz, durch das die vollständig diskretisierte F-u-Kurve propagiert wird und das als Ergebnis die Verfestigungsparameter  $R_o$ ,  $e^*$  und  $n$  sowie die Parameter  $f_N$  und  $f_c$  des GTN-Materialmodells liefert, wurden für die experimentell ermittelten F-u-Kurven verschiedener Proben des Werkstoffs 10MnMoNi55 Parametersätze gefunden, die in Tabelle 1 angegeben sind, wobei einmal der Parametersatz angegeben ist, der als Teil der Datenbasis die geringsten Abweichungen zum Experiment liefert (Simulation) und derjenige Parametersatz, den das neuronale Netz für das jeweilige Experiment liefert (Netz). Das neuronale Netz wurde mit 3125 simulierten F-u-Kurven trainiert, wobei die Parameter  $E = 206500 \text{ MPa}$ ,  $f_0 = 0.002$ ,  $f_t = 0.2$ ,  $e_{N_s} = 0.3$ ,  $s_N = 0.1$  als konstant angenommen wurden.  $e^*$  wurde indirekt mit  $s^*(e_{pl} = 1)$  über Gleichung (2) identifiziert.

Probe	001mpa		017mpa		018mpa	
	Simulation	Netz	Simulation	Netz	Simulation	Netz
$f_N$	0.045	0.051	0.06	0.047	0.045	0.053
$f_c$	0.143	0.172	0.18	0.171	0.143	0.182
$s_F(e_{pl} = 1)$	1077	1060	1004	1069	1077	1099
$R_e$	287	146	160	129	287	154
$e^*$	1.73e-4	9.60 e-8	5.97 e-4	4.95 e-8	1.73 e-4	5.69 e-8
$n$	6.55	8.13	6.55	7.96	6.55	8.49

**Tabelle 1:** Materialparameter für 18Ch2MFA ( $R_e$  und  $s_F$  in [MPa])



**Bild 5:** Vergleich von F-u-Kurven für die Probe 017mpa

Der Vergleich zwischen Experiment und den Simulationen, die mit den beiden verschiedenen Parametersätzen der Probe 017mpa berechnet wurden, zeigt nur marginale Abweichungen zwischen der identifizierten F-u-Kurve und dem experimentellen Ergebnis. Die identifizierten Parameter des Verfestigungsgesetzes weisen geringe Unterschiede auf, definieren aber sehr ähnliche Verfestigungskurven.

In Tabelle 2 sind die identifizierten Materialparameter für den Reaktordeckelstahl 18Ch2MFA angegeben, mit denen sowohl der SPT als auch der Zugversuch an gekerbten Rundzugproben mit variierendem Kerbradius zufriedenstellend simuliert werden konnte.

Parameter	Simulationen	nach MÜLLER [7]
$R_e$	600 MPa	650 MPa
$s_F(e_{pl} = 1)$	900 MPa	1014.44 MPa
$e^*$	0.0003008	0.003553
$n$	20	12.667
$f_0$	0.002	Keine Schädigungsparameter
$f_c$	0.062	
$f_N$	0.03	
$f_t$	0.2	
$q_t$	1.5	
$e_N$	0.3	
$s_N$	0.1	

**Tabelle 2:** Materialparameter für 18Ch2MFA

Der Verlauf der simulierten F-u-Kurve für das Material 18Ch2MFA in Bild 6 liegt etwas unterhalb der experimentell ermittelten, was auf eine für größere Dehnungen etwas zu flach verlaufende Fließkurve hindeutet.

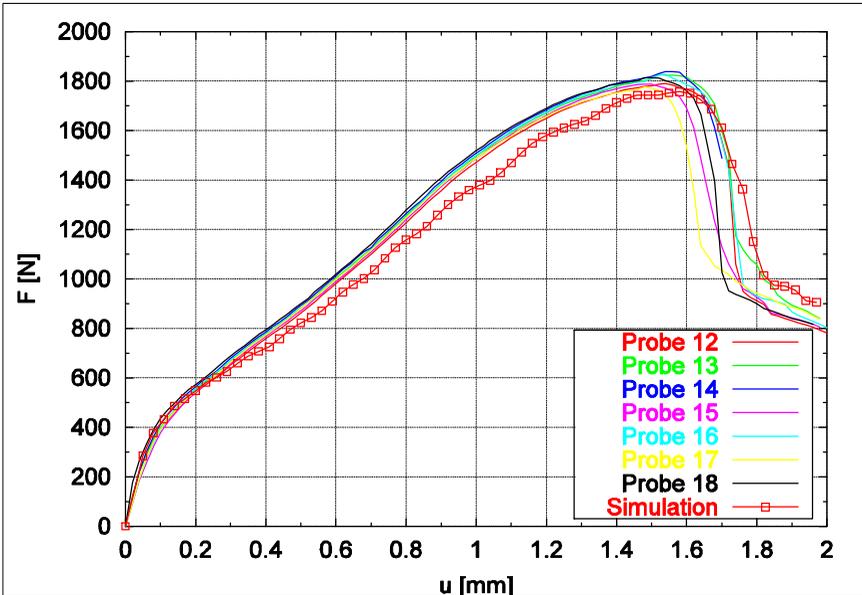


Bild 6: F-u-Kurven des SPT für 18Ch2MFA

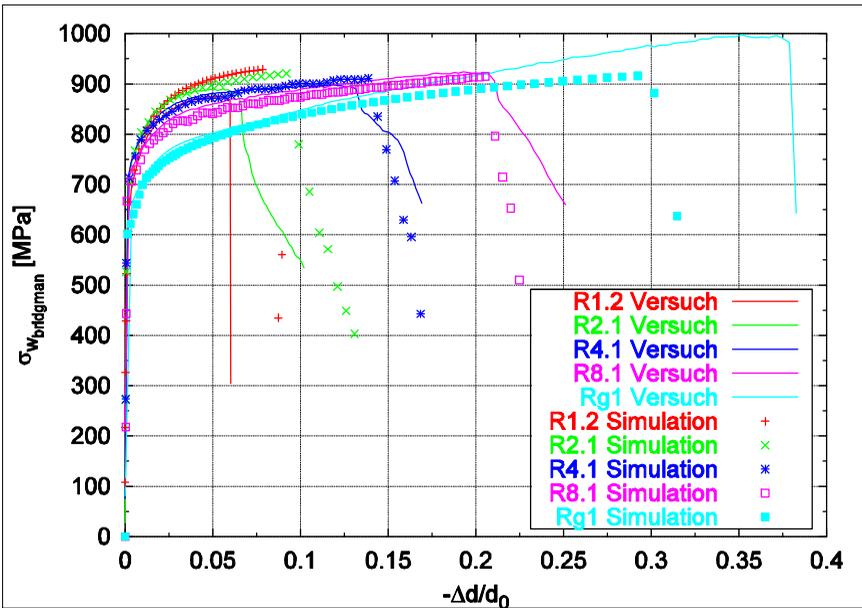
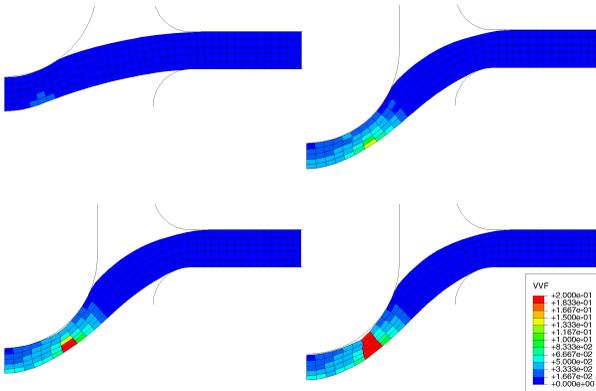
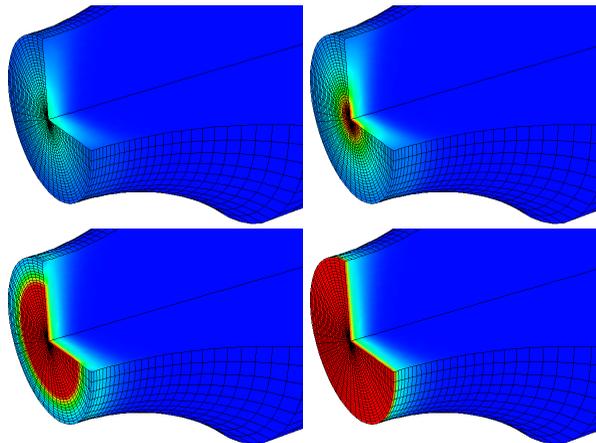


Bild 7: Spannungs-Dehnungs-Kurven der Zugversuche für 18Ch2MFA

Das wird auch bei der Simulation der glatten Rundzugprobe (Rg1 in Bild 7) deutlich. Für die gekerbten Rundzugproben mit den Radien 4 und 8 mm (R4.1 und R8.1) wird das Einsetzen des Bruches sehr gut vorhergesagt. Für die kleineren Kerbradien 2 und 1 mm (Rg2.1 und Rg1.2) wird das Einsetzen des Bruches unterschätzt. Das lässt den Schluss zu, dass der Einfluss der Mehrachsigkeit, der über den Parameter  $q_1$  verändert werden kann, nicht genau genug eingestellt wurde.



**Bild 8:** Schädigungsentwicklung an einer SPT-Probe



**Bild 9:** Schädigungsentwicklung an der Rundzugprobe R8.1

In Bild 8 wird die Entwicklung der Schädigung an einer SPT-Probe bei den Stempelverschiebungen  $u=0.5, 1.5, 1.8$  und  $1.9$  mm veranschaulicht. Die Farbstufen visualisieren den Wert des aktuellen Anteils des Porenvolumens (VVF-void volume fraction), der letztlich das Maß für die Schädigung darstellt. Die Schädigung beginnt an der Probenunterseite an der Stelle, an der die größten äquivalenten plastischen Vergleichsdehnungen auftreten und erreicht einen kritischen Wert, bei dem lokales Versagen auftritt. Der so initiierte Riss wächst durch den gesamten Querschnitt, bis zum kompletten Versagen der Probe.

Bei den Simulationen der gekerbten Rundzugproben beginnt die Schädigung in der Probenmitte und der sich bildende kreisförmige Innenriss wächst von innen nach außen bis zum vollständigen Versagen des Querschnitts. In Bild 9 ist die Entwicklung der Schädigung dargestellt, wobei die Querdehnungen  $-Dd/d_0=0.1566, 0.1888, 0.2304$  und  $0.2586$  betragen.

Das wird auch bei der Simulation der glatten Rundzugprobe (Rg1 in Bild 7) deutlich. Für die gekerbten Rundzugproben mit den Radien 4 und 8 mm (R4.1 und R8.1) wird das Einsetzen des Bruches sehr gut vorhergesagt. Für die kleineren Kerbradien 2 und 1 mm (Rg2.1 und Rg1.2) wird das Einsetzen des Bruches unterschätzt. Das lässt den Schluss zu, dass der Einfluss der Mehrachsigkeit, der über den Parameter  $q_1$  verändert werden kann, nicht genau genug eingestellt wurde.

## 6 Literatur

- [1] Baik, Jai-Man, Kameda J., Buck O., "Small Punch Test evaluation of intergranular embrittlement of an alloy steel", Scripta Metallurgica, Vol. 17, pp. 1443-1447, 1983
- [2] Bernauer G., Brocks W., Muehlich U., Steglich D., Werwer M., "Hinweise zur Anwendung des Gurson-Tvergaard-Needleman-Modells", Technical Note GKSS/WMG/99/10, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht, 1999
- [3] Bridgman P.W., "Studies in Large Plastic Flow and Fracture", McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, Toronto, London, 1952
- [4] Foulds J.R., Viswanathan R., "Small Punch Testing for Determining Material Toughness of Alloy Steel Components in Service", Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 116, pp. 457-464, 1994
- [5] Gurson A. L., "Porous rigid-plastic materials containing rigid inclusions, yield function, plastic potential, void nucleation", Int. Journal of Fracture, pp. 357-364, 1977
- [6] Lauschke U., Kuna M., "Bestimmung von Verformungs- und Versagenseigenschaften duktiler Werkstoffe aus dem Small Punch Test", DVM-Bericht 232 Festigkeits- und Bruchverhalten von Fügeverbindungen, pp. 367-376, 2000
- [7] Pusch G., Müller K., "Bruchmechanische Bewertung des Reaktorstahls 18Ch2MFA nach dem Risseinleitungs- und Rissauffangkonzept", BMFT-Forschungsvorhaben, 1994