

Manuskript zum Sonderheft „Materialprüfung“ Bestimmung und Übertragung schädigungsmechanischer Parameter duktiler Werkstoffe aus dem Small Punch Test

Meinhard Kuna^a, Martin Abendroth^b

a) TU-Bergakademie Freiberg

b) Forschungszentrum Rossendorf

31. August 2004

Zusammenfassung

Der Small Punch Test (SPT) ist ein Kleinstprobenversuch, der sich zur Bestimmung des aktuellen lokalen Materialzustandes in (industrie)technischen Anlagen unter Betriebsbedingungen eignet. Dieser Artikel stellt ein kombiniertes experimentell-numerisches Verfahren zur Identifikation von Verfestigungs- und Versagenseigenschaften duktiler Werkstoffe aus dem SPT vor. Ein schädigungsmechanisches Materialmodell dient zur Beschreibung des Probenverhaltens. Die Einflüsse der Parameter des schädigungsmechanischen Materialmodells auf das Versuchsergebnis werden anhand von FEM-Simulationen des SPT dargestellt. Neuronale Netze werden mit diesen Simulationen trainiert und stellen so einen generalisierten Zusammenhang zwischen Materialparametern und Versuchsergebnis dar, der in einem Optimierungsalgorithmus zur Identifikation der unbekanntenen schädigungsmechanischen Materialparameter benutzt wird. Die identifizierten Materialparameter lassen sich auf andere Probengeometrien übertragen und ermöglichen eine Vorhersage von bruchmechanischen Werkstoffkennwerten.

1 Einführung

Die Veränderung des Werkstoffverhaltens in technischen Anlagen durch Alterung und verschiedene betriebliche Beanspruchungen wie z.B. mechanische, thermische, chemische und Strahlungsbelastung erfordern eine in-situ Überwachung des Werkstoffzustandes. Um die Beschädigung der zu überwachenden Anlagen möglichst gering zu halten ist eine minimal invasive Probenentnahme, d.h. die Verwendung von Kleinstproben, wünschenswert. Auch für die Charakterisierung von Strukturen mit Eigenschaftsgradienten wie z.B. Schweißnähten ist die Verwendung von Kleinstproben vorteilhaft.

Beim SPT wird eine kleine scheibenförmige Probe ($\varnothing 8 \times 0.5$ mm) in einem Miniatur-tiefziehversuch bis zum Versagen belastet. Das zentrale Versuchsergebnis des SPT ist die Kraft-Verschiebungs-Kurve für den Druckstempel, die Informationen über das Materialverhalten des getesteten Werkstoffs enthält. Der SPT wurde ursprünglich eingeführt, um die Materialversprödung durch Strahlungsbelastung zu überwachen [1, 2, 3, 4]. Dabei konnten Messergebnisse des SPT empirisch mit Daten von konventionellen Proben (Fließspannung, Zugfestigkeit, Bruchenergie) korreliert werden. Auch zur Ermittlung von Verfestigungseigenschaften [5, 6] und bruchmechanischen Kenngrößen (K_{Ic} , J_{Ic}) [7, 8] wurde

der SPT erfolgreich eingesetzt. In jüngster Zeit wurde der SPT zur auch zur Identifikation schädigungsmechanischer Materialeigenschaften angewandt [9, 10, 11].

Um das Informationspotential der Kraft-Verschiebungs-Kurve des SPT zu erschließen, werden neuronale Netze mit Ergebnissen von FEM-Simulationen des SPT trainiert. Zur Verwendung neuronaler Netze als Approximation für direkte oder inverse Probleme der Kontinuumsmechanik, bzw. zur Identifikation von Parametern von konstitutiven Materialgesetzen sind z.B. von HUBER [12] grundlegende Untersuchungen durchgeführt worden. In einem Trainingsprozess approximieren die neuronalen Netze das kontinuumsmechanische Randwertproblem des SPT, also den Verlauf der Kraft-Verschiebungs-Kurve in Abhängigkeit der Materialparameter.

Die Schädigung duktiler Materialien geschieht aus mikrostruktureller Sicht durch die Entstehung, das Wachstum und die Vereinigung von Mikroporen im Werkstoff aufgrund äußerer Belastung. Die Schädigungsmechanik stellt kontinuumsmechanische konstitutive Materialmodelle zur Beschreibung dieser Phänomene zur Verfügung. Im allgemeinen beinhalten diese Modelle eine Vielzahl von Parametern, die für die meisten Werkstoffe unbekannt sind und deren Bestimmung Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten [13, 14, 15] ist. Bei den Simulationen des SPT wird für die Probe das schädigungsmechanische Materialmodell von GURSON, TVERGAARD und NEEDLEMAN (GTN-Modell) verwendet, welches in der Lage ist, im Rahmen einer Theorie großer Deformationen das Versagensverhalten eines Werkstoffs zu beschreiben.

Die Schädigungsparameter des GTN-Modells werden durch die Minimierung des Fehlers zwischen der Approximation des Randwertproblems und dem experimentellen Ergebnis des SPT innerhalb einer Optimierungsroutine identifiziert. Aufgrund der Hypothese, dass der Mechanismus duktilen Materialversagens zum einen von der Probengeometrie unabhängig ist und zum anderen durch das GTN-Modell adäquat beschrieben werden kann, lassen sich durch Simulation von Zug- und Bruchmechanikproben unter Verwendung der aus dem SPT identifizierten Materialparameter klassische Festigkeits- und bruchmechanische Kenngrößen vorhersagen.

2 Experimentelle Methoden

Die aus dem SPT resultierende Kraft-Verschiebungs-Kurve lässt sich qualitativ in mehrere Abschnitte unterteilen, wie es in Abb. 1 dargestellt ist. Der Abschnitt I wird hauptsächlich durch die elastischen Eigenschaften der Probe charakterisiert. Im Abschnitt II plastifiziert der Probenquerschnitt und geht über in Abschnitt III, in dem der Tiefziehvorgang mit einhergehender Materialverfestigung abläuft. Im nun degressiv ansteigenden Abschnitt IV der Kraft-Verschiebungs-Kurve übersteigt die einsetzende geometrische Entfestigung die materielle Verfestigung der Probe und es kommt zu einer Lokalisierung der Werkstoffschädigung, die zum Anriss und daraus folgend zum (duktilen) Versagen im Abschnitt V führt. Die verbleibende Kraft im Abschnitt VI wird benötigt um den Stempel durch die schon gebrochene Probe zu drücken.

Die SPT-Apparatur (Abb. 2) 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 miteinander verschraubt werden. Der Stempel (2) wird im Niederhalter geführt, so dass er die Probe zentrisch deformieren kann. An einem Klemmring (10) ist ein

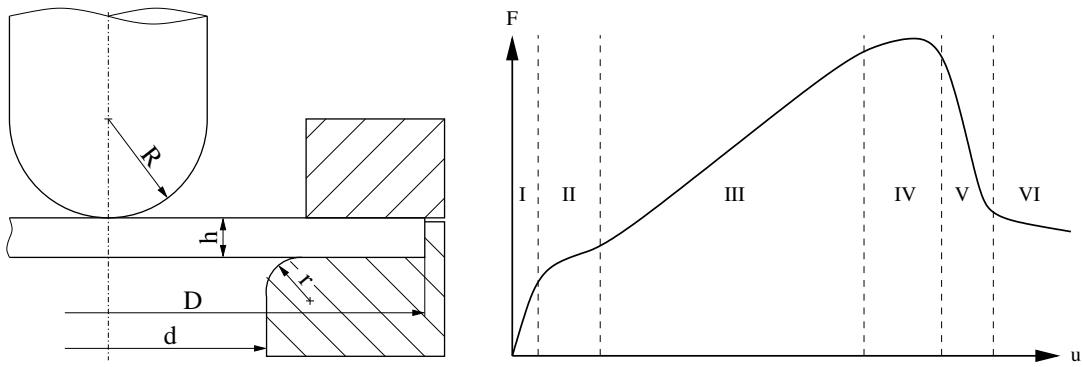


Abbildung 1: Schematische Darstellung des SPT und der resultierenden Kraft-Verschiebungs-Kurve für einen isotropen duktilen Werkstoff bei RT

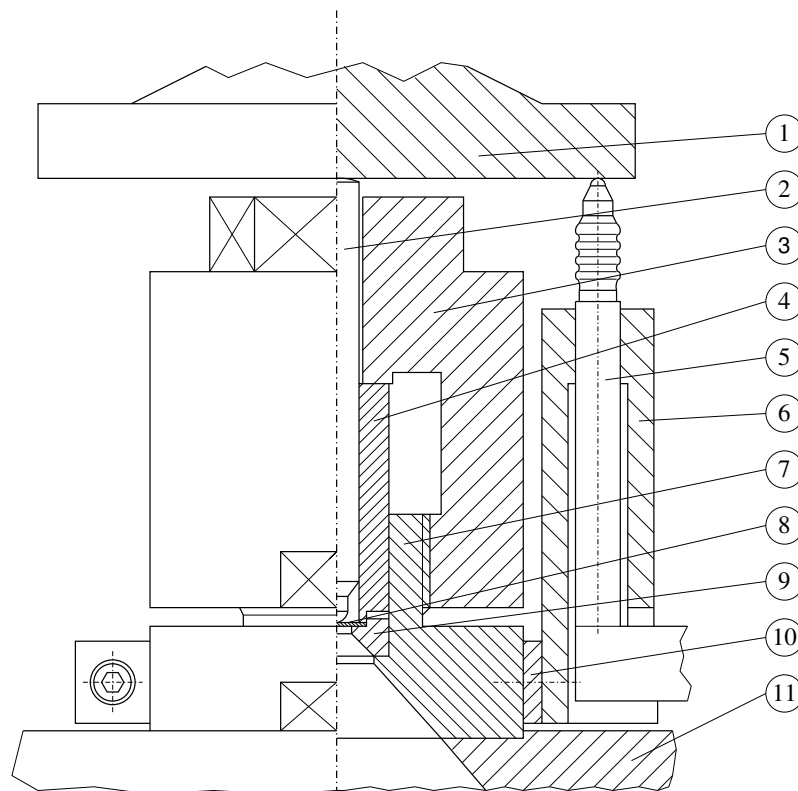


Abbildung 2: Small Punch Apparatur im Teilschnitt

Halter (6) für den induktiven Wegaufnehmer (5) befestigt. Der Wegaufnehmer ist parallel zum Stempel angeordnet, so dass die Verschiebung u des Druckstempels (1) unabhängig von den elastischen Deformationen der Prüfmaschine gemessen wird. Die gesamte kompakte SPT-Apparatur sitzt zentriert auf einer Grundplatte (11). Diese Apparatur ist in eine konventionelle Prüfmaschine eingebaut (Shimadzu AGS-10kN), die als Druckversuch gefahren wird.

Für Verifikationszwecke werden auch Zugversuche an gekerbten Rundzugproben (Abb. 3) durchgeführt. Dabei werden mit einem Videoextensometer Längs- und Querdehnung sowie der Kerbradius im Bereich der Einschnürung gemessen, was die Ermittlung der wahren Spannungen in Abhängigkeit der Mehrachsigkeit des Spannungszustandes möglich macht.

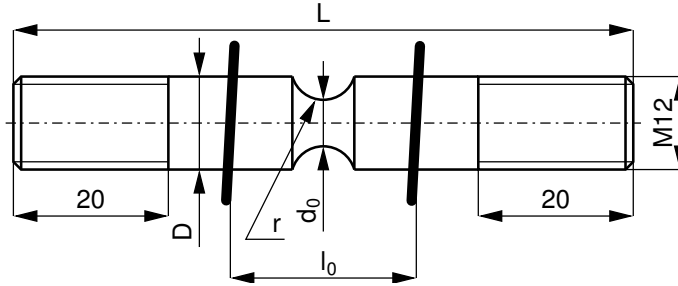


Abbildung 3: Gekerbte Rundzugproben mit Messmarken für die Dehnungsmessung

3 Parameteridentifikation

Zur Identifikation der Schädigungsparameter können zwei prinzipiell verschiedene Strategien verfolgt werden, wie es ABENDROTH & KUNA in [9, 10, 11] zeigen. Hier wird eine indirekte Strategie (siehe Abb. 4) angewendet, in der ein neuronales Netz das kontinuumsmechanische Randwertproblem des SPT approximiert und zur Identifikation ein nichtlinearer Optimierungsalgorithmus (SQP-Algorithmus [16, 17]) verwendet wird. Die Kraft-Verschiebungs-Kurve des SPT ist eine Funktion für die Stempelkraft in Abhängigkeit der Stempelverschiebung u und einem Materialparametersatz par_i . Diese Funktion wird an diskreten Stellen für vorher festgelegte Parametersätze durch FE-Simulationen des SPT bestimmt. Daraus resultieren sogenannte Pattern, die jeweils aus einem Netzeingabevektor für die normierte Stempelverschiebung und die normierten Materialparameter $[u, par_1, \dots, par_i]^T$, sowie dem entsprechenden Funktionswert für die Stempelkraft $F(u)|_{par_i}$ als Netzausgabe bestehen. Die notwendige Normierung erfolgt jeweils linear, so dass die Elemente des Eingangsvektors im Intervall $[-0.25, 0.25]$ liegen. Die Stempelkraft wird ebenfalls so linear normiert, dass der Wert im Intervall $[0.25, 0.75]$ liegt. Eine Lernaufgabe (die zu approximierende Funktion) besteht aus einer Vielzahl dieser Pattern.

Das neuronale Netz generalisiert diese Funktion in einem Trainingsprozess [18] und man erhält eine Approximation für das Randwertproblem $F'(u)|_{par'_i}$, deren Genauigkeit durch einen Vergleich mit nicht trainierten Pattern (Validierungspattern) abgeschätzt werden kann. Innerhalb der Optimierungsroutine ersetzt das neuronale Netz die FE-Rechnung, was zu einer erheblichen Zeiteinsparung für die Identifikation führt.

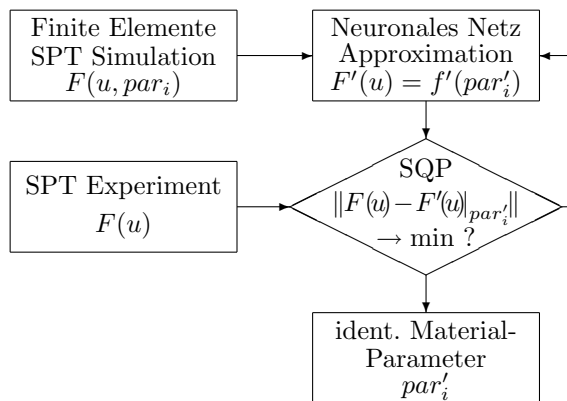


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Strategie zur Parameteridentifikation

Die hier verwendeten neuronalen Netze gehören zur Klasse der Multilayerperceptrons [18]. Im vorliegenden Fall bestehen sie aus drei Schichten von Neuronen mit sigmoider Übertragungsfunktion, die ausschließlich in Vorwärtsrichtung vernetzt sind.

4 FEM-Analyse der Einflussgrößen

Das für die Modellierung der SP-Probe verwendete konstitutive Materialmodell basiert auf Arbeiten von GURSON [19], TVERGAARD und NEEDLEMAN [20, 21]. Es wird ein elastisch plastisches Kontinuum modelliert, in dem kugelförmige Hohlräume (Poren, Voids) entstehen und wachsen können. Das Kernstück dieses Modells ist die Fließbedingung

$$\Phi = \left[\frac{\Sigma_V}{\sigma_F(\bar{\varepsilon}_m^{pl})} \right]^2 + 2q_1 f^* \cosh \left[\frac{3}{2} q_2 \frac{\Sigma_H}{\sigma_F(\bar{\varepsilon}_m^{pl})} \right] - [1 + (q_1 f^*)^2] = 0 \quad (1)$$

mit der v. MISES-Vergleichsspannung $\Sigma_V = \sqrt{\frac{3}{2} \Sigma'_{ij} \Sigma'_{ij}}$ und der hydrostatischen Spannung $\Sigma_H = \frac{1}{3} \Sigma_{kk}$, ausgedrückt durch die makroskopischen (deviatorischen) CAUCHY-Spannungen Σ_{ij} (Σ'_{ij}). Die Schädigungsvariable ist mit f^* bezeichnet, q_1 und q_2 sind Parameter, mit denen die einzelnen Terme der Fließbedingung gewichtet werden können. $\sigma_F(\bar{\varepsilon}_m^{pl})$ stellt die einachsige wahre Spannungs-Dehnungs-Kurve dar, welche die isotrope Verfestigung des Matrixmaterials im Rahmen der v. MISES-Vergleichsgrößen beschreibt.

$$\sigma_F(\bar{\varepsilon}_m^{pl}) = \begin{cases} \sigma_0 & \text{wenn } \bar{\varepsilon}_m^{pl} < \varepsilon_L \\ \sigma_0 \left[\frac{\bar{\varepsilon}_m^{pl} - \varepsilon_L}{\varepsilon^*} + 1 \right]^{\frac{1}{n}} & \text{wenn } \bar{\varepsilon}_m^{pl} \geq \varepsilon_L \end{cases} \quad (2)$$

mit

$$\varepsilon^* = \frac{\varepsilon_{pl}^*}{\left[\frac{\sigma^*}{\sigma_0} \right]^n - 1} \quad (3)$$

σ_0 charakterisiert die initiale Fließspannung, σ^* die Fließspannung bei einer plastischen Dehnung ε_{pl}^* , wobei hier $\varepsilon_{pl}^* = 1$ gesetzt wird. Mit n wird der Verfestigungsexponent bezeichnet und ε_L definiert die Lüdersdehnung. Die Schädigung f^* in Gl. (1) ist eine Funktion des Porenvolumenanteils f .

$$f^* = \begin{cases} f & \text{wenn } f \leq f_c \\ f_c + \frac{1/q_1 - f_c}{f_f - f_c} (f - f_c) & \text{wenn } f_c < f < f_f \end{cases} \quad (4)$$

In Gl. (4) ist f_c der kritische Porenvolumenanteil, ab dem ein beschleunigtes Porenwachstum (Porenkoaleszenz) modelliert wird und f_f der Porenvolumenanteil, bei dem lokales Versagen des Werkstoffes angenommen wird.

Die Änderung des Porenvolumenanteils setzt sich additiv aus zwei Termen zusammen

$$\dot{f} = \dot{f}_{gr} + \dot{f}_{nucl}, \quad (5)$$

wobei \dot{f}_{gr} die Änderung infolge Porenwachstums und \dot{f}_{nucl} die Änderung infolge der Porenneubildung beschreibt. Der Wachstumsterm basiert auf dem Gesetz der Massenerhaltung, ist also von der makroskopischen plastischen Volumendehnrates \dot{E}_{kk}^{pl} abhängig.

$$\dot{f}_{gr} = (1 - f) \dot{E}_{kk}^{pl} \quad (6)$$

Die Porenneubildung erfolgt in Abhängigkeit der plastischen Vergleichsdehnrate des Matrixmaterials

$$\dot{f}_{nucl} = A \dot{\bar{\varepsilon}}_m^{pl} \quad (7)$$

und einer Normalverteilung

$$A = \frac{f_N}{s_N \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\bar{\varepsilon}_m^{pl} - \varepsilon_N}{s_N} \right)^2 \right], \quad (8)$$

die mit dem Mittelwert ε_N , der Standardabweichung s_N und dem entstehenden Porenvolumenanteil f_N definiert ist.

Die makroskopische plastische Dehnrate \dot{E}_{ij}^{pl} liegt normal zur Fließfläche

$$\dot{E}_{ij}^{pl} = \dot{\lambda} \frac{\partial \Phi}{\partial \Sigma_{ij}}, \quad (9)$$

wobei $\dot{\lambda}$ den plastischen Multiplikator bezeichnet. Die Evolutionsgleichung für die äquivalente plastische Dehnrate des Matrixmaterials

$$\dot{\bar{\varepsilon}}_m^{pl} = \frac{\Sigma_{ij} \dot{E}_{ij}^{pl}}{(1-f)\sigma_F} \quad (10)$$

wird aus der Gleichung für die äquivalente plastische makroskopische Arbeit hergeleitet.

Die Fortran-Routine zur Implementierung des GTN-Modells in den FE-Code ABAQUS erfolgt über die Materialchnittstelle UMAT und wurde basierend auf Arbeiten von ARAVAS [22] und ZHANG [23] am GKSS [24, 25] entwickelt.

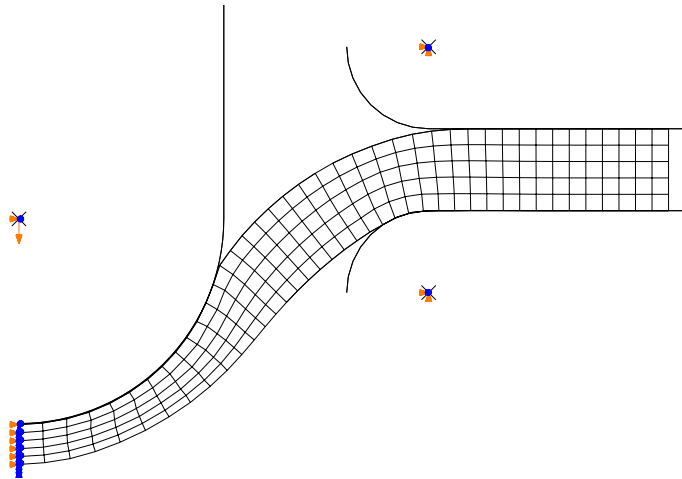


Abbildung 5: Das FE-Modell des Small Punch Test

Das zur Simulation des SPT verwendete axialsymmetrische FE-Netz zeigt Abb. 5. Die Probe ist mit 5×40 axialsymmetrischen 4-Knoten-Elementen modelliert. Stempel, Matrize und Niederhalter sind als starre Körper modelliert und bis auf den Stempel, der vertikal verschiebbar ist, in allen Freiheitsgraden fixiert. Die auftretenden Kontakte berücksichtigen COULOMBSche Reibung mit einem Reibungskoeffizienten von $\mu = 0.25$.

Im folgenden werden die Einflüsse der einzelnen Parameter des GTN-Modells auf das simulierte Messergebnis des SPT betrachtet. Es wird jeweils ein Parameter variiert, während

die anderen Parameter bei den folgenden Werten verbleiben: $E = 200 \text{ GPa}$, $\nu = 0.3$, $\sigma_0 = 400 \text{ MPa}$, $\sigma^* = 900 \text{ MPa}$, $n = 7.5$, $\varepsilon_L = 0.01$, $f_0 = 0.004$, $f_c = 0.1$, $f_N = 0.03$, $f_f = 0.2$, $\varepsilon_N = 0.3$, $s_N = 0.1$, $q_1 = 1.5$, $q_2 = 1.0$.

Eine Erhöhung der Fließgrenze σ_0 bzw. der Lüdersdehnung ε_L (siehe Abb. 6 und 7) bewirken ein Anheben bzw. Verbreitern des Plateaus im Abschnitt II der Kraft-Verschiebungs-Kurve.

Der Parameter σ^* definiert die Fließspannung bei einer plastischen Dehnung $\varepsilon_{pl}^* = 1$ und hat damit entscheidenden Einfluß auf die im Versuch auftretende Maximalkraft (siehe Abb. 8). Der Verfestigungsexponent n beeinflusst den gesamten ansteigenden Teil der Kraft-Verschiebungs-Kurve (siehe Abb. 9).

Die Parameter f_0 und f_N bestimmen den Anfangs- bzw. Neubildungsanteil des Porenvolumens im Material und haben damit einen Einfluß auf den Versagenszeitpunkt der Probe (siehe Abb. 10 und 11), je größer die jeweiligen Werte sind, desto früher erfolgt das Versagen.

Der Parameter ε_N bestimmt den Mittelwert der Verteilungsfunktion für die Porennukleation. Je kleiner der Wert ist, desto früher entstehen neue wachsende Poren, was ein früheres Versagen nach sich zieht (siehe Abb. 13). Die Breite der Verteilung, bestimmt durch den Parameter s_N , hat einen wesentlich schwächeren Einfluß auf den Versagenszeitpunkt (siehe Abb. 12).

Einer der wichtigsten Parameter des GTN-Modell ist f_c , der Porenvolumenanteil, ab dem ein beschleunigtes Porenwachstum modelliert wird und der oft mit Porenkoaleszenz (und der Initiierung von Mikrorissen) gleichgesetzt wird. Der Parameter f_f definiert den Porenvolumenanteil, bei dem lokales Versagen postuliert wird. Im FE-Modell bedeutet das die Herabsetzung der Steifigkeit im Integrationspunkt eines Elementes auf einen Wert nahe Null. Je kleiner beide Werte sind, desto früher tritt das Versagen ein, wie aus Abb. 14 und 15 deutlich wird. Wichtig ist hier auch die Relation der beiden Parameter zueinander. Liegt f_f nur knapp über f_c , so wird ein stark beschleunigtes Porenwachstum modelliert, so dass f_c als der eigentliche Versagensparameter angesehen werden kann. Ist dagegen f_f viel größer als f_c , so ist das Porenwachstum ab f_c nur schwach beschleunigt und f_f bestimmt den Versagenszeitpunkt. Oft wird auch die Steigung $\kappa = \frac{1/q_1 - f_c}{f_f - f_c}$ der Funktion $f^*(f) = f_c + \kappa(f - f_c)$ für $f_c < f < f_f$ als Parameter benutzt, was dann den Versagensporenvolumenanteil f_f von f_c , q_1 und κ abhängig macht: $f_f = f_c + \frac{1}{\kappa}(\frac{1}{q_1} - f_c)$.

Der Parameter q_1 bestimmt indirekt entweder den Versagensporenvolumenanteil f_f oder das beschleunigte Porenwachstum κ im Modell, was sich ebenfalls auf den Zeitpunkt des Versagens auswirkt (Abb. 16 und 17). Durch den Parameter q_2 wird in der Fließbedingung (Gl. 1) direkt der Einfluß der Mehrachsigkeit gewichtet, die wiederum maßgeblich das Porenwachstum bestimmt. Bei Versuchen mit höherer Mehrachsigkeit gewinnt q_2 an Bedeutung.

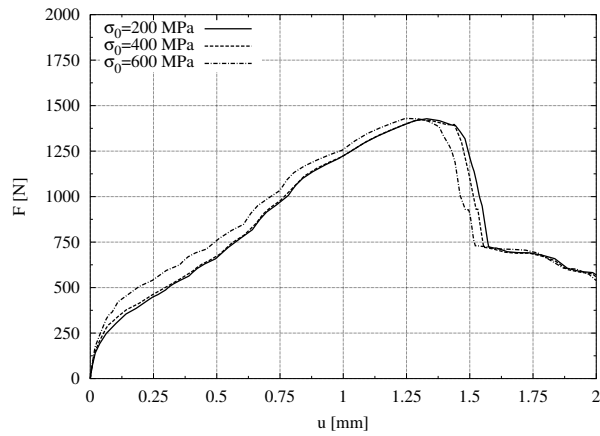


Abbildung 6: Einfluss der Fließgrenze σ_0 auf die Kraft-Verschiebungs-Kurve des SPT

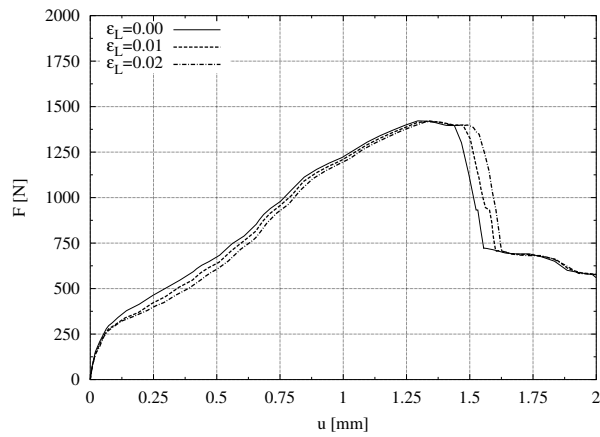


Abbildung 7: Einfluss der Lüdersdehnung ϵ_L auf die Kraft-Verschiebungs-Kurve des SPT

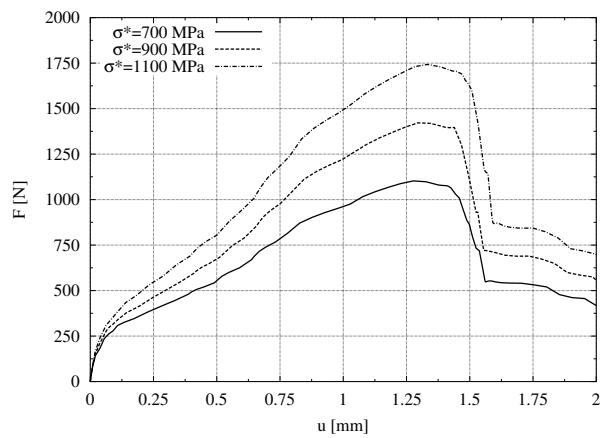


Abbildung 8: Einfluss des Verfestigungsparameters σ^* auf die Kraft-Verschiebungs-Kurve des SPT

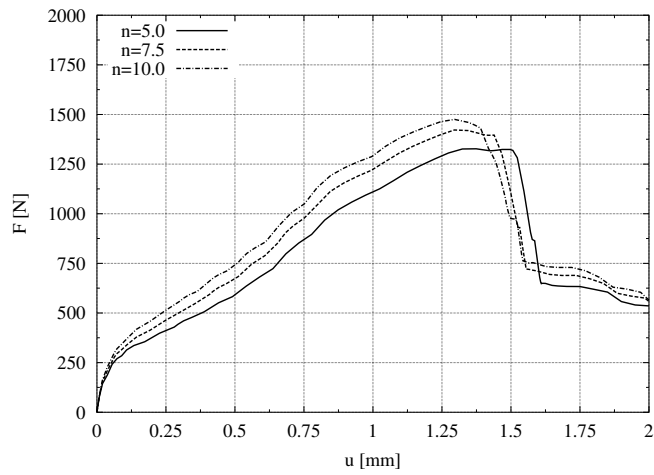


Abbildung 9: Einfluss des Verfestigungsparameters n auf die Kraft-Verschiebungs-Kurve des SPT

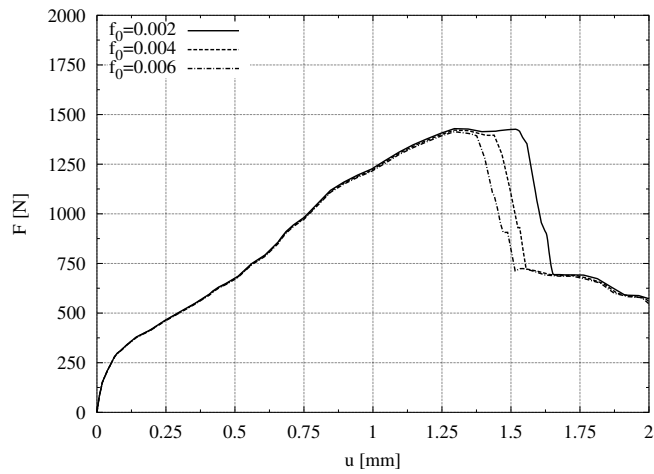


Abbildung 10: Einfluss des Anfangsporenvolumenanteils f_0 auf die Kraft-Verschiebungs-Kurve des SPT

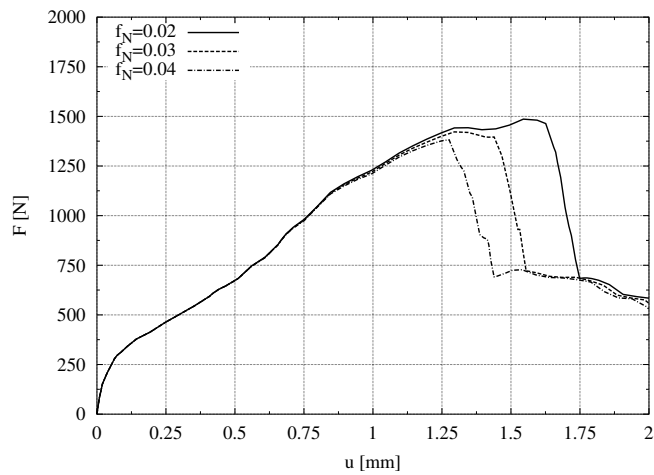


Abbildung 11: Einfluss des Porenneubildungsanteils f_N auf die Kraft-Verschiebungs-Kurve des SPT

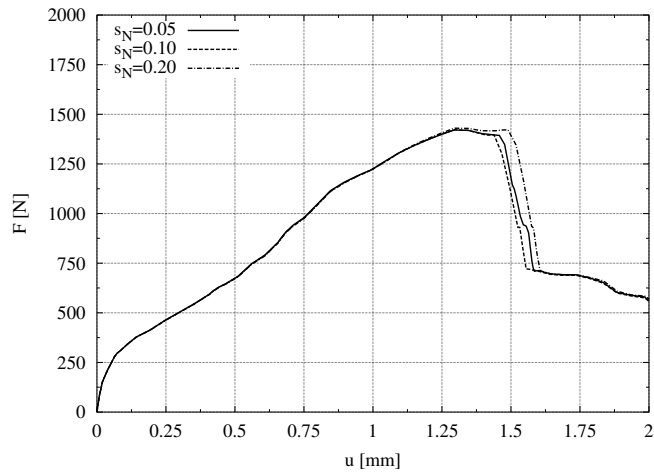


Abbildung 12: Einfluss der Normalverteilungsbreite s_N für die Porenneubildung auf die Kraft-Verschiebungs-Kurve des SPT

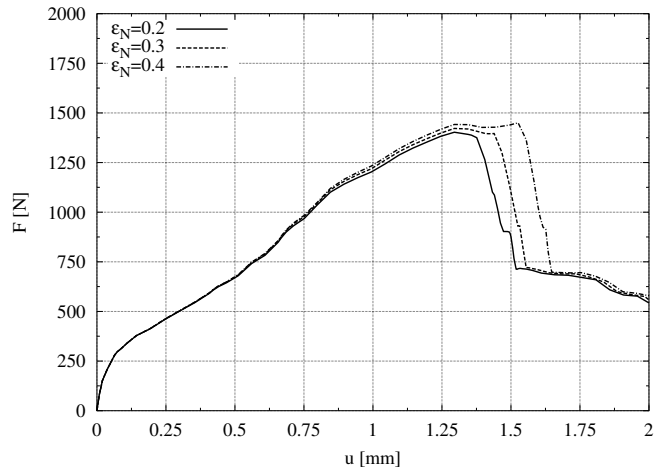


Abbildung 13: Einfluss der Mittelwertes der Normalverteilung ϵ_N für die Porenneubildung auf die Kraft-Verschiebungs-Kurve des SPT

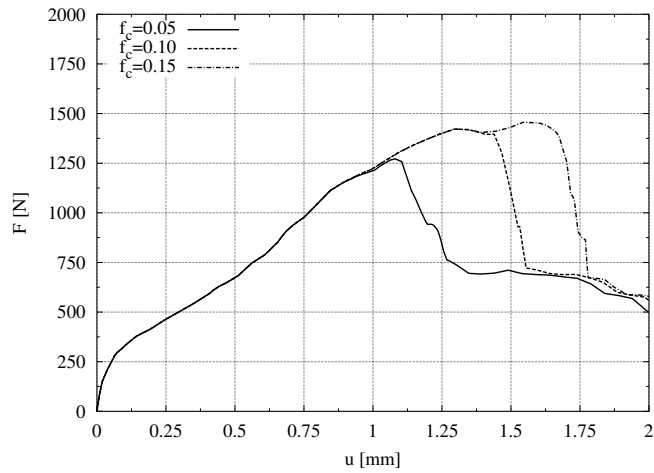


Abbildung 14: Einfluss des kritischen Porenvolumenanteils f_c auf die Kraft-Verschiebungs-Kurve des SPT

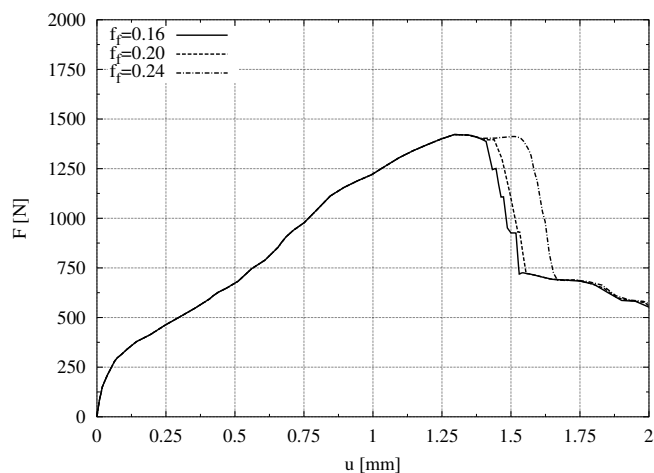


Abbildung 15: Einfluss des finalen Porenvolumenanteils f_f auf die Kraft-Verschiebungs-Kurve des SPT

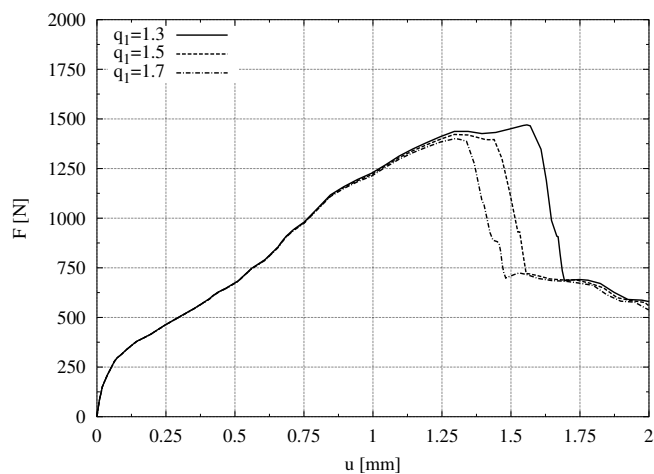


Abbildung 16: Einfluss des Schädigungsparameters q_1 auf die Kraft-Verschiebungs-Kurve des SPT

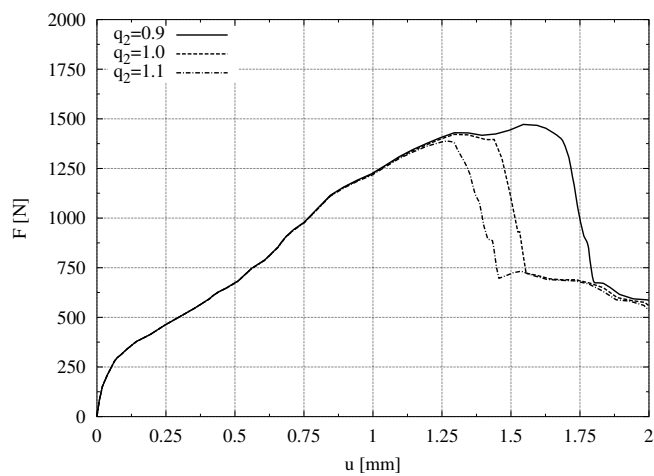


Abbildung 17: Einfluss des Schädigungsparameters q_2 auf die Kraft-Verschiebungs-Kurve des SPT

5 Anwendung und Ergebnisse

Die Identifikation der Materialparameter erfolgt für den Werkstoff StE690 in zwei Schritten. Zunächst werden die Parameter identifiziert, die das Verfestigungsverhalten bestimmen. Das dazu benutzte neuronale Netz besteht aus fünf Eingangsneuronen, für die Stempelverschiebung u und die vier Parameter zur Beschreibung der wahren Spannungs-Dehnungs-Kurve nach Gl. (2) σ_0 , σ^* , n und ε_L . Die mittlere Schicht enthält 10 Neuronen und die Ausgangsschicht ein einzelnes Neuron für die Stempelkraft F . Die folgende Tabelle zeigt die Variation der Parameter zur Berechnung der Datenbasis:

Parameter	von	bis	steps
σ_0 [MPa]	200	700	7
σ^* [MPa]	800	1300	7
n	5	15	7
ε_L	0.00	0.02	7

Zur Beschreibung des elastischen Verhaltens wurden $E = 200$ GPa und $\nu = 0.3$ gesetzt. f_0 und f_N sind hier zu Null gesetzt, d.h. auch alle anderen Schädigungsparameter bleiben ohne Wirkung und das Modell entspricht der v. MISES-Plastizität. Aus den Parametervariationen resultieren $7^4 = 2401$ simulierte Kraft-Verschiebungs-Kurven, die jeweils durch 11 Punkte dargestellt werden. Damit ergeben sich insgesamt $7^4 \cdot 11 = 26411$ Pattern, wobei der Eingangsvektor hier aus der normierten Stempelverschiebung und den normierten Materialparametern besteht und der Ausgangsvektor nur aus der dazugehörigen Stempelkraft.

Diese Datenbasis wurde im Verhältnis 9:1 in Trainings- und Validierungspattern aufgeteilt. Nach 1000 Lernepochen mit einem SCG-Algorithmus (siehe hierzu [18]) betrug der Fehler sowohl für die Trainings- als auch für die Validierungspattern 0.00013. Dieser Fehler ist als die mittlere quadratische Differenz der wahren normierten Stempelkraft F_n^{norm} und der jeweiligen Netzausgabe a_n für alle N Trainings- bzw. Validierungspattern definiert

$$err = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (F_n^{norm} - a_n)^2, \quad (11)$$

wobei $err = 0.00013$ hier einer durchschnittlichen Abweichung von ca. 0.8 N entspricht.

Mit diesem neuronalen Netz wurden für 10 SP-Proben die in Tab. 1 angegebenen Parameter identifiziert. Abbildung 18 vergleicht die so identifizierte Fließkurve (Durchschnittsparametersatz aus Tab. 1) für StE690 mit Angaben aus Arbeiten, die an der BAM von KLINGBEIL et al. [26], bzw. an der RWTH Aachen von SCHIFFMANN [27] durchgeführt wurden. Bis zur plastischen Dehnung von 50% ist eine gute Übereinstimmung mit der BAM-Kurve zu verzeichnen. Ein Vergleich darüber hinaus zeigt eine bis zu 10%-ige Abweichung, wobei aber zu beachten ist, dass dort nur noch extrapolierte Werte aus dem Experiment (Zugversuch BAM) angegeben sein können. Die Übereinstimmung mit der von SCHIFFMANN (RWTH) angegebenen Kurve kann als sehr gut bezeichnet werden.

In einem zweiten Schritt wurde zur Identifikation der Schädigungsparameter eine weitere Datenbasis berechnet. Für die Verfestigungsparameter wurden der Durchschnittsparametersatz aus Tab. 1 angenommen. Variiert wurden die in der folgenden Tabelle angegebenen fünf Parameter des GTN-Modells.

Probe	σ_0 [MPa]	σ^* [MPa]	n	ε_L	Fehler
1	1187.8	699.0	11.346	0.00351	0.00467
2	1108.1	668.2	12.090	0.01178	0.00485
3	1163.0	700.2	8.699	0.00615	0.00458
4	1050.3	721.2	11.288	0.00363	0.00359
5	1083.3	668.1	10.002	0.01667	0.00605
6	1022.6	673.4	11.919	0.01779	0.00412
7	1062.0	686.2	9.979	0.01412	0.00384
8	1140.4	696.1	11.127	0.01525	0.00448
9	1052.9	668.5	10.783	0.00118	0.00652
10	1067.8	730.3	11.966	0.01815	0.00445
\bar{x}	1093.8	691.1	10.922	0.01082	0.00472

Tabelle 1: Identifizierte Verfestigungsparameter für StE690

Parameter	von	bis	steps
ε_N	0.20	0.60	4
f_N	0.01	0.03	4
f_c	0.04	0.16	4
q_1	1.30	1.50	4
q_2	1.00	1.30	4

Die folgenden Parameter blieben unverändert:

E	ν	σ_0	σ^*	ε_L	n	f_0	f_f	s_N
[GPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
199	0.3	690	1100	0.01	11.0	0.002	0.2	0.1

Die Festlegungen für f_0 , f_f und s_N beruhen auf Erfahrungswerten. Der initiale Porenvolumenanteil f_0 wird oft aus der chemischen Zusammensetzung des Werkstoffs hergeleitet. Da hier der nukleierende Porenvolumenanteil f_N ca. eine Größenordnung höher als f_0 angenommen wird, ist eine genaue Angabe von f_0 von zweitrangiger Bedeutung. Kleine Ungenauigkeiten bei der Annahme für f_0 werden durch eine genaue Identifizierung von f_N ausgeglichen. Ähnlich verhält es sich mit der Annahme eines Wertes für den Porenvolumenanteil bei Materialversagen f_f . Mikroskopische Analysen der Bruchflächen ermöglichen eine Abschätzung für den Wert dieses Parameters. Mit dem Parameter f_c existiert noch ein Freiheitsgrad im Modell, mit dem das lokale Werkstoffversagen eingestellt werden kann.

Insgesamt wurden $4^5 = 1024$ Versuche zur Erstellung der Datenbasis simuliert, wobei jede berechnete Kraft-Verschiebungs-Kurve durch 41 Wertepaare für Kraft und Stempelverschiebung diskretisiert wurde, woraus insgesamt $4^5 \cdot 41 = 41984$ Pattern resultierten, die auch hier im Verhältnis 9:1 in Trainings und Validierungspattern aufgeteilt wurden. Das verwendete neuronale Netz bestand aus 6, 25 und 1 Neuronen für Eingabe-, mittlere und Ausgabeschicht. Hier konnte erfolgreich ausschließlich mit dem resilient Backpropagation Algorithmus (RPROP) [18] trainiert werden. Nach 1000 Lernepochen betrug der Fehler (siehe Gl. 11) 0.00035 für den Trainingsdatensatz und 0.00039 für den Validierungsdatensatz, was einer durchschnittlichen Abweichung von 1.75 N bzw. 1.95 N zwischen appro-

ximierten und simulierten Kraft-Verschiebungs-Kurven entspricht. Für acht SP-Proben wurden die in Tab. 2 angegebenen Schädigungsparameter bestimmt.

Probe	ε_N	f_N	f_c	q_1	q_2	Fehler
1	0.5232	0.0300	0.1551	1.500	1.196	0.0110
2	0.5777	0.0281	0.1545	1.500	1.272	0.0068
3	0.6000	0.0300	0.1487	1.300	1.211	0.0133
4	0.5880	0.0300	0.1519	1.500	1.191	0.0086
5	0.6000	0.0300	0.1003	1.345	1.156	0.0108
6	0.2000	0.0100	0.1396	1.385	1.244	0.0103
7	0.6000	0.0300	0.1430	1.500	1.300	0.0110
8	0.5932	0.0300	0.0922	1.319	1.136	0.0173
\bar{x}	0.5352	0.0273	0.1357	1.419	1.213	0.0111

Tabelle 2: Identifizierte Schädigungsparameter StE690

Abb. 19 vergleicht die mit den Durchschnittswerten der identifizierten Schädigungsparameter simulierte Kraft-Verschiebungs-Kurve mit allen acht Experimenten. In Abb. 20 werden Experiment und Simulation mit identifizierten Materialparametern für die Probe 2 verglichen, wobei auch hier eine gute Übereinstimmung verzeichnet werden kann.

In Abb. 21 werden die Ergebnisse der Zugversuche mit denen der Simulationen (Durchschnittsparametersatz aus Tab. 2) verglichen. Insbesondere bei den Proben mit den kleinen Kerbradien (R1, R2 und R4) ist die Übereinstimmung mit den Experimenten sehr gut. Für die Probe R8.1 und die glatte Rundzugprobe Rg1 wird der Versagenszeitpunkt etwas unterschätzt. Die gute Übereinstimmung der Simulationen mit den Zugversuchen gelingt hier nur, wenn auch die Parameter q_1 und q_2 identifiziert werden, die den Einfluß der Mehrachsigkeit in der Fließbedingung wichten.

Im Rahmen einer Arbeit an der BAM [26] wurden Versuche an seitengekerbten Dreipunktbiegeproben (SEB-Proben) durchgeführt, um unter anderem Risswiderstandskurven für StE690 zu bestimmen.

Das GTN-Modell ermöglicht die Simulation des stabilen duktilen Risswachstums. Der simulierte Riss manifestiert sich als eine Kette von geschädigten Elementen entlang des Ligamentes, deren Steifigkeit bei $f = f_f$ auf einen Wert nahe Null gesetzt wird. Das FE-Programm ABAQUS ermöglicht die Berechnung des elastoplastischen J-Integrals [28], was in Form eines Gebietsintegrals ausgewertet wird. Um dem experimentell ermittelten Fernfeld-J-Wert zu entsprechen, wurde ein möglichst großes Gebiet gewählt, das die Risspitze ein- aber die Kräfteinleitungspunkte ausschließt. Die Simulation wurde unter der Annahme eines ebenen Verzerrungszustandes ($\varepsilon_{zz} = 0$) durchgeführt, wobei die Elementgröße im Schädigungsbereich wie bei den Simulationen des SPT und der Zugversuche 0.1×0.1 mm betrug.

Das Ergebnis der Simulation dieses Versuchs mit den am SPT identifizierten Materialparametern (Durchschnittsparametersätze aus Tab. 1 und 2) sind in Abb. 22 dargestellt. Die simulierte $J - \Delta a$ -Kurve zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den experimentellen Daten, was den Schluss zulässt, dass ein allgemeingültiger Parametersatz für diesen Werkstoff identifiziert wurde.

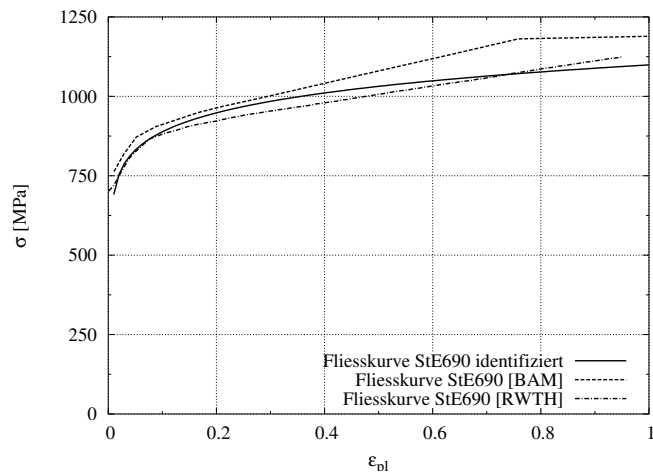


Abbildung 18: Vergleich der identifizierten wahren Spannungs-Dehnungs-Kurve für StE690 mit Literaturangaben [26, 27]

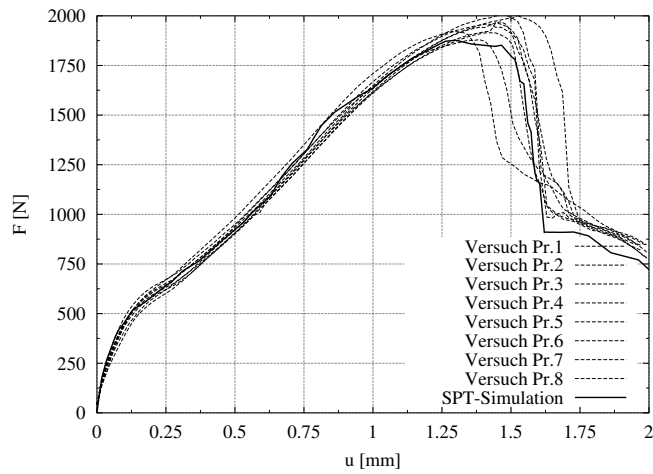


Abbildung 19: Vergleich der Ergebnisse von Experimenten und Simulationen mit den identifizierten Materialparametern

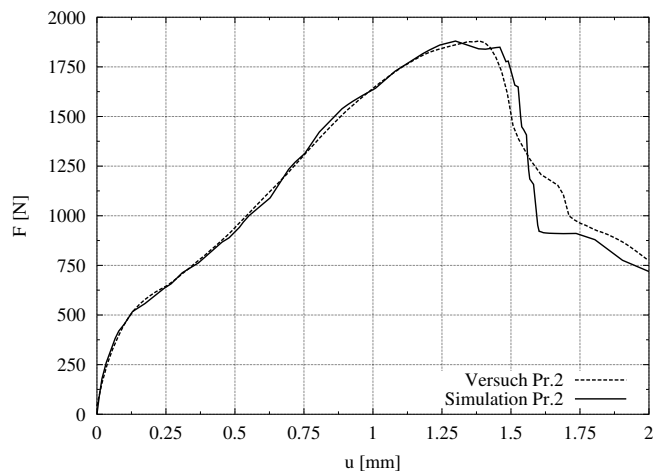


Abbildung 20: Vergleich der Ergebnisse von Experiment und Simulation mit den identifizierten Materialparametern für Probe 2

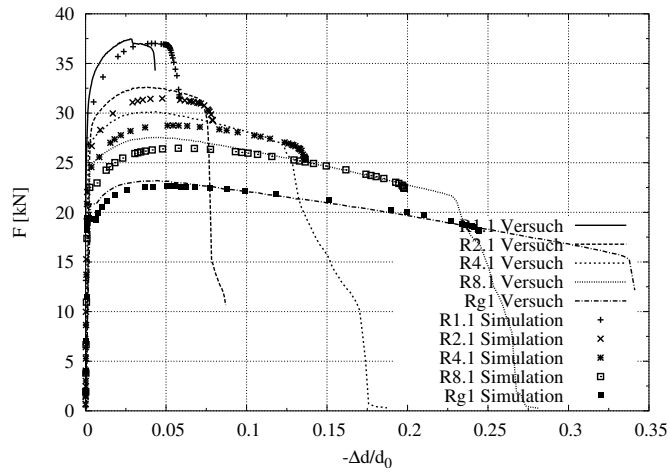


Abbildung 21: Vergleich der Ergebnisse von Experimenten und Simulationen mit den identifizierten Materialparametern, Kraft-Einschnürung für die Zugproben

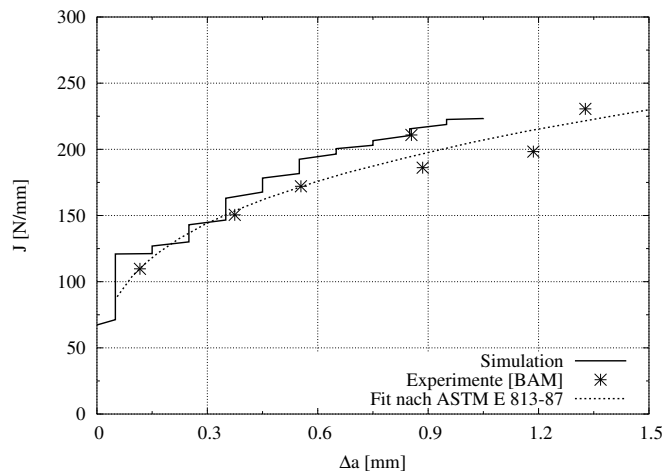


Abbildung 22: Vergleich der Ergebnisse von Experimenten [26] und der Simulation mit den identifizierten Materialparametern, Risswiderstandskurve, SEB-Probe 20%Seitenkerb, $B=13\text{mm}$, $W=26\text{mm}$, $a_0/W=0.51$

6 Schlussfolgerungen

Die vorliegenden Untersuchungen haben gezeigt, dass der SPT ein aussagekräftiger Kleinstprobenversuch ist, dessen Kraft-Verschiebungs-Kurve sehr sensibel auf die Verfestigungs- und Schädigungseigenschaften eines duktilen metallischen Werkstoffs reagiert. Er ist deshalb sehr gut für die Identifikation der entsprechenden Materialparameter geeignet. Der bestechende Vorteil des SPT besteht im geringen Bedarf an Probenmaterial, der nur ca. 1/100 einer Kerbschlagprobe CVN10 oder 1/2000 einer Bruchmechanikprobe CT-25 beträgt. Daneben zeichnet sich der SPT durch eine relativ einfache Probenfertigung und eine kleine Versuchsapparatur aus, die auch in Klimakammern oder heiße Zellen eingebaut werden kann. Die Nachteile des Versuchs – die Auswertung und Interpretation der komplexen Beanspruchung und Verformung – können durch moderne numerische Berechnungsverfahren problemlos überwunden werden. Als entscheidend wird hierbei die Nutzung fortschrittlicher Materialgesetze der duktilen Schädigungsmechanik angesehen, die wissenschaftlich die Grundlage dafür bilden, dass die aus dem SPT gewonnenen Materialparameter auf übliche Großproben übertragen werden können und dass man selbst bruchmechanische Kennwerte erfolgreich durch Simulation abschätzen kann.

7 Danksagung

Die Autoren danken der DFG für die Förderung dieser Arbeiten mit dem Projekt Ku 929/5.

Literatur

- [1] Manahan, M., Argon, A., and Harling, O. *Journal of Nuclear Materials* **103–104**, 1545–1550 (1981).
- [2] Baik, J., Kameda, J., and Buck, O. *Scripta Metallurgica* **17**, 1443–1447 (1983).
- [3] Foulds, J., Jewett, C., Bisbee, L., Gabel, T., and Viswanathan, R. *ASME* **18**, 151–157 (1992).
- [4] Jitsukawa, S., Kizaki, M., Umino, A., Shiba, K., and Hishinuma, A. *ASTM Special Technical Publication, Published by ASTM* **1204**, 289–307 (1993).
- [5] Fleury, E. and Ha, J. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* **75**(9), 699–706 (1998).
- [6] Sainte Catherine, C., Messier, J., Poussard, C., Rosinski, S., and Foulds, J. In *Small Specimens Test Techniques*, volume 4, 350–370, (2002).
- [7] Bulloch, J. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* **75**(11), 791–804 (1998).
- [8] Mao, X., Saito, M., and Takahashi, H. *Scr. Metall. Mater.* **25**(11), 2481–2485 (2000).
- [9] Abendroth, M. and Kuna, M. *Computational Materials Science* **28**(3–4), 633–644 (2003).

- [10] Abendroth, M. and Kuna, M. In *DVM-Bericht 235, Fortschritte der Bruch- und Schädigungsmechanik*, 269–278, (2003).
- [11] Abendroth, M. and Kuna, M. *Advanced Engineering Materials* **6**(7) (2004).
- [12] Huber, N. *Anwendung Neuronaler Netze bei nichtlinearen Problemen der Mechanik*. Habilitationsschrift, Universität Karlsruhe, (2000).
- [13] Bernauer, G. and Brocks, W. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* **25**, 363–384 (2002).
- [14] Mahnken, R. *International Journal of Plasticity* **18**(7), 801–831 (2002).
- [15] Springmann, M. and Kuna, M. *Computational Materials Science* **26**, 202–209 (2002).
- [16] Brent, R. *Algorithms for Minimization Without Derivatives*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., (1973).
- [17] Powell, M. *Computer J.* **7**, 155–162 (1964).
- [18] Zell, A. *SNNS Stuttgart Neural Network Simulator, User Manual, Version 4.2*, (1995).
- [19] Gurson, A. *Journal of Engineering Materials and Technology* **99**, 2–15 (1977).
- [20] Tvergaard, V. *International Journal of Fracture Mechanics* **17**, 389–407 (1981).
- [21] Tvergaard, V. and Needleman, A. *Acta Mechanica Sinica* **32**(1), 157–169 (1984).
- [22] Aravas, N. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* **24**, 1395–1416 (1987).
- [23] Zhang, Z. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* **121**, 29–44 (1995).
- [24] Siegmund, T. and Brocks, W. Technical note gkss/wmg/97/2, (1997).
- [25] Bernauer, G., Brocks, W., Muehlich, U., Steglich, D., and Werwer, M. Technical Note GKSS/WMG/99/10, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht, (1999).
- [26] Klingbeil, D., Brocks, W., Fricke, S., Arndt, S., Reusch, F., and Kiyak, Y. interner Bericht BAM-V.31 98/2, Bundesanstalt für Materialforschung- und prüfung, (1998).
- [27] Schiffmann, R. *Experimentelle Bestimmung und modellmäßige Beschreibung der Schädigung beim Gleitbruch von Stählen*. Dissertation, RWTH Aachen, (2001).
- [28] Hibbitt, Karlsson, and Sorensen. *ABAQUS Theory Manual*. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. USA, (2001).