

Ermittlung von Werkstoffdaten zur Berechnung großer plastischer Verformungen mittels Finite-Elemente-Methoden

Mänz, T.

Das Fließverhalten von Werkstoffen wird in Strukturanalysen üblicherweise nur ansatzweise abgebildet. Die Gründe hierfür sind vielfältig. So sind die Daten in der Regel nicht vorhanden, das Konvergenzverhalten der Berechnung verschlechtert sich aufgrund der Nichtlinearität beträchtlich und der Nutzen bezüglich der Abschätzung der Bauteilfestigkeit ist gering. Es gibt jedoch Fälle, wie z. B. Umformsimulationen, in denen auf die genauen Fließeigenschaften nicht verzichtet werden kann. Im Folgenden wird ein Ansatz vorgestellt, mit dem die Werkstoffeigenschaften ermittelt werden können.



The flow behavior of materials, used in structural analyses, is usually mapped only rudimental. The reasons are manifold. For instance, the data is generally not available, the convergence behavior of the calculation worsen significantly due to the nonlinearity and the benefits in terms of estimating the strength of the component is low. However, there are cases, such as metal forming, in which the exact flow properties cannot be neglected. In the following, an approach is presented on how the material properties can be determined.

1 Einleitung

Die Festlegung der Werkstoffeigenschaften von Bauteilen, die mittels Finite-Elemente-Methoden (FEM) untersucht werden sollen, erfolgt üblicherweise mittels Datenblättern, Herstellerangaben oder Zugversuchen. Dabei reichen standardisierte Größen (E-Modul, Streckgrenze, Zugfestigkeit, Bruchdehnung, Querkontraktionszahl) in der Regel aus, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Bei der Finite-Elemente-Berechnung von großen plastischen Verformungen, wie sie z. B. bei Umformsimulationen auftreten, reichen diese Verfahren zur Bestimmung der Werkstoffeigenschaften nicht aus. Das Fließverhalten des Werkstoffs hat in diesen Fällen einen großen Einfluss auf das Verhalten. So hängen die Verformungen, die dabei auftretenden Span-

nungen und Reaktionskräfte in großem Maße von den Werkstoffeigenschaften ab. Im Folgenden soll ein allgemein gültiges Vorgehen zur Bestimmung der notwendigen Eigenschaften, basierend auf standardisierten Werkstoffuntersuchungen, vorgestellt werden.

2 Allgemeine Vorgehensweise zur Bestimmung der Werkstoffeigenschaften

Der Zugversuch nach /1/ ist zwar nicht ausreichend zur Beschreibung der Werkstoffeigenschaften, bildet jedoch die Grundlage für das weitere Vorgehen. Innerhalb der Gleichmaßdehnung der Zugprobe, also bis zum Beginn der Brucheinschnürung, können die gemessenen Ingenieurgrößen direkt in die von FE-Systemen benötigten Werkstoffkenngrößen umgerechnet werden (u. a. /3/). Die benötigten logarithmischen Dehnungen (Index „log“) werden nach Gl. 2.1 aus den gemessenen Ingenieurdehnungen (Index „ing“) ermittelt. Die wahren oder Cauchy-Spannungen entsprechen dem Quotienten aus gemessener Kraft F und wahren Spannungsquerschnitt A_{wahr} und werden aus den gemessenen Ingenieurspannungen sowie den gemessenen Dehnungen in Zugrichtung $\varepsilon_{x,\text{ing}}$ nach Gl. 2.2 berechnet.

$$\varepsilon_{\log} = \ln \left(1 + \varepsilon_{\text{ing}} \right) \quad 2.1$$

$$\sigma_{\text{Cauchy}} = \frac{F}{A_{\text{wahr}}} = \sigma_{\text{ing}} \left(1 + \varepsilon_{x,\text{ing}} \right) \quad 2.2$$

Ein so ermitteltes Spannungs-Dehnungsdiagramm ist Grundlage für alle FE-Berechnungen bei denen die Fließkurve berücksichtigt wird und kleine plastischen Dehnungen auftreten. Abbildung 1 zeigt das Ingenieur- sowie das Cauchy-Spannungs-Dehnungs-Diagramm im Vergleich.

Über die Gleichmaßdehnung hinaus können aus den gemessenen Werten keine Werkstoffgrößen mehr bestimmt werden, da die Verformung der Zugprobe und damit der wahre Spannungsquerschnitt unbekannt sind. Dieses Problem wird deutlich, wenn man sich die Variation an Verformungen bzw. Brüchen (duktiler, spröder Bruch sowie Mischformen) vor Augen führt (vgl. Abbildung 1, rechts).

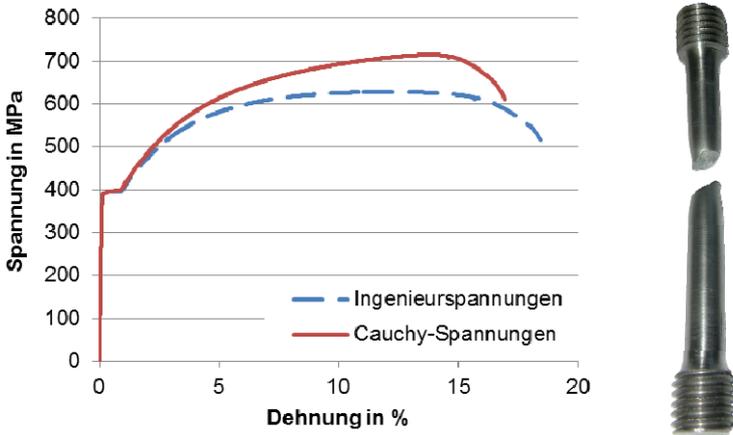


Abbildung 1: Darstellung des Spannungs-Dehnungsdiagramms mit gemessenen (Ingenieur-) Spannungen und wahren (Cauchy-) Spannung sowie der Zugprobe

Abhilfe schafft hier ein Stauchversuch /3/. Wird ein zylindrischer Probenkörper gestaucht, tritt keine plötzliche Instabilität auf, sondern der Probendurchmesser und damit der Spannungsquerschnitt wachsen mit zunehmender Verformung an. Somit tritt keine Entfestigung (negative Steigung im (Ingenieur-) Spannungs-Dehnungs-Diagramm) auf und die Ergebnisse können über den gesamten Verformungsbereich ausgewertet werden. Auf einen Zugversuch kann jedoch nicht verzichtet werden, denn:

- die Ergebnisse des Stauchversuchs können bei kleinen Kräften fehlerbehaftet sein, z. B. durch nicht exakt parallele Stirnflächen, die zum sogenannten „Anschnäbeln“ führen (siehe auch Abbildung 2: der Hook'sche Bereich ist keine Gerade) und vergleichsweise kleinen Proben, die die messtechnische Erfassung der Kennwerte erschweren und
- im Stauchversuch bildet sich keine ausgeprägte Streckgrenze aus.

Weiterhin tritt aufgrund der Reibung an den Stirnflächen genaugenommen keine Gleichmaßdehnung auf. Die Probe wird durch die Verformung ballig (vgl. Abbildung 2, rechts). Dementsprechend können die gemessenen Spannungen und Dehnungen nicht direkt für die Beschreibung des Werkstoffverhaltens genutzt werden. Stattdessen wird der reale Stauchversuch mittels FEM-Berechnung nachgerechnet. Das Ergebnis ist ein Spannungs-Dehnungsdiagramm, das

genauso ermittelt wird wie das gemessene. Falls Abweichungen bestehen, kann die Fließkurve entsprechend angepasst werden. Ein ausreichend gutes Ergebnis benötigt in der Regel nur wenige Iterationen. Abbildung 2 zeigt die gute Übereinstimmung zwischen Versuch (durchgezogene Linie) und Berechnung (Strich-Punkt-Linie) im Bereich von plastischen Verformungen, also ab etwa 5 % Dehnung. In dem Bereich kleinerer Dehnungen treten bei der realen Probe die oben erwähnten Probleme auf, wie beispielsweise nicht exakt parallele Stirnflächen. Im idealisierten FEM-Modell tritt diese Problematik natürlich nicht auf, weshalb der Verlauf linear mit einer Steigung entsprechend des E-Moduls ist.

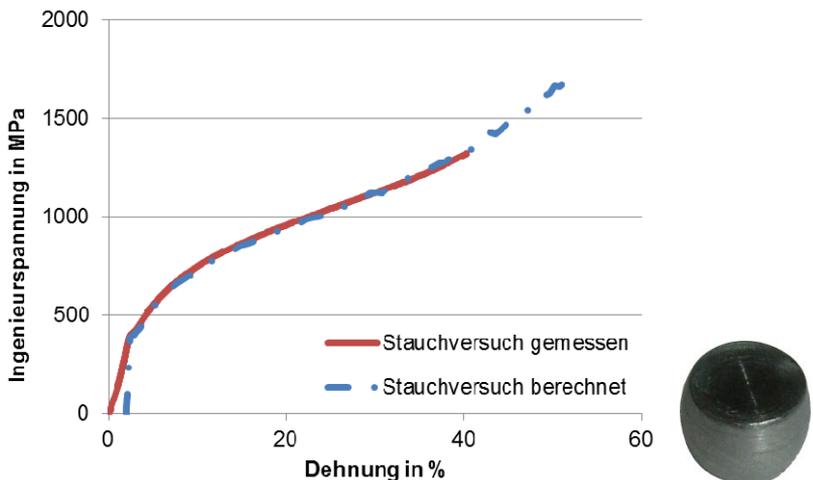


Abbildung 2: Vergleich der gemessenen und berechneten Spannungen und Dehnungen eines Stauchversuchs; rechts: eine Probe nach dem Versuch

Abbildung 3 zeigt den gesamten Ablauf zur Bestimmung der Werkstoffeigenschaften mit den Vor- und Nachteilen von Zug- und Stauchversuch sowie den Iterationsschleifen zur Anpassung der Fließkurve.

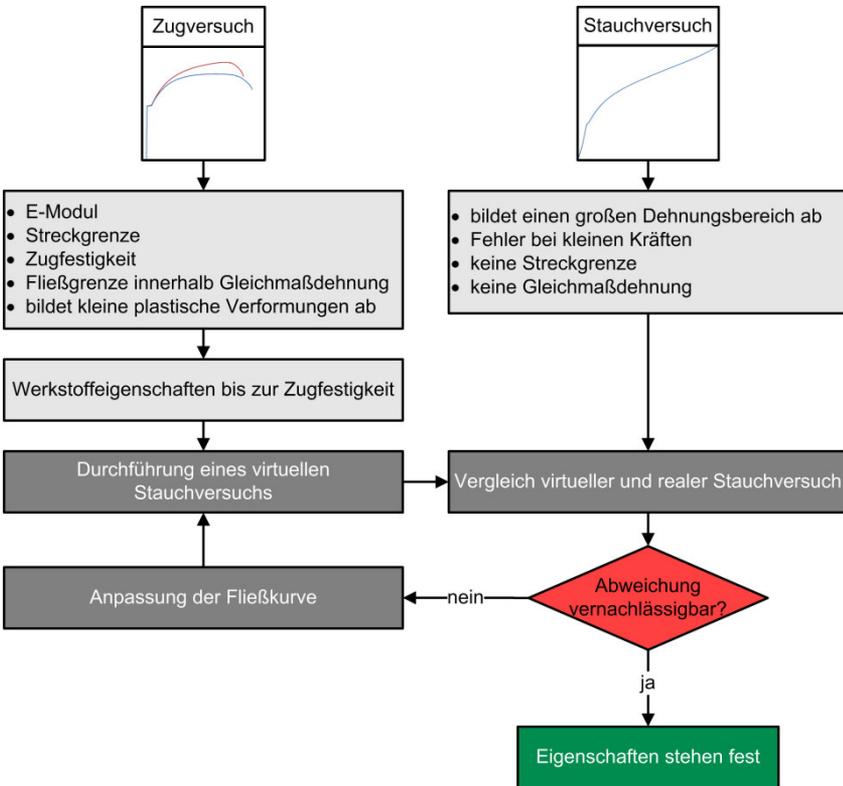


Abbildung 3: Flussdiagramm zur Ermittlung der Werkstoffeigenschaften

3 Anwendung in einer Umformsimulation

Die oben vorgestellte Vorgehensweise wurde im Rahmen des laufenden FVA-Projektes Nr. 658 I (AiF-Fördernr. 17086 N/1) zu gerändelten Pressverbindungen angewendet. Bei einer solchen Pressverbindung wird in der Regel die Welle mit achsparallelen Riefen gerändelt, erhält also eine Verzahnung, die Nabe dagegen ist glatt. Weiterhin weist die Welle durch entsprechende Werkstoffwahl bzw. durch einen Härtevorgang eine wesentlich höhere Härte auf als die Nabe. Da es sich um einen Längspressverband handelt, wird die Nabe beim Fügen durch die Welle verzahnt, die Welle ist also gleichzeitig Werkzeug und Bauteil. Abbildung 4 zeigt eine Verbindung mit gerändelter Welle und

glatter Nabe. Die Welle wird beim Fügen mit einer Kraft F_e in die Nabe eingepresst.

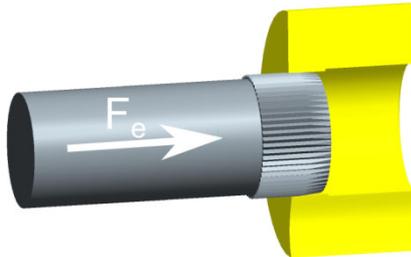


Abbildung 4: Pressverbindung mit gerändelter Welle

Eine solche Pressverbindung vereint die Vorteile von reibschlüssigen und formschlüssigen Welle-Nabe-Verbindungen, wie:

- hohe statische Übertragungsfähigkeit,
- kein Spiel in der Verbindung,
- geringe Empfindlichkeit gegenüber Teilungsabweichungen,
- hohe Verdrehsicherheit.

Je nach Wellengeometrie kann die Verzahnung der Nabe spanend oder umformend, d. h. die Zahnlücken werden eingedrückt, erfolgen. Hierbei treten sehr hohe Umformgrade auf, die natürlich auch in der Simulation des Fügevorgangs berücksichtigt werden müssen.

Im Rahmen des Projektes wurden sowohl Versuche als auch Berechnungen zum Fügevorgang an einer abgewinkelten Pressfuge durchgeführt. Das heißt es wurde ein Versuchsaufbau mit ebenen Kontaktflächen entwickelt, mit dem die Radialkräfte sehr genau ermittelt werden können. Diese hängen neben der Geometrie vor allem von den Fließeigenschaften des sich verformenden Werkstoffs ab. Andere Größen, wie z. B. die Reibung haben dagegen keinen Einfluss auf die Radialkräfte. Daher lässt sich die vorgestellte Vorgehensweise sehr gut validieren.

Abbildung 5 verdeutlicht die starke Verformung der Nabe durch den Fügeprozess. Zur Verringerung der Rechenzeit wurde das Modell auf einen Zahn reduziert. Im linken Teil ist die noch glatte Nabe (unten) zu erkennen, während sich der gerändelte Zahn (oben) im Bild hinter der Nabe befindet. Im Fügeprozess wird der Zahn „aus dem Bild heraus“ nach vorne gepresst. Dabei wird die Nabe durch den gerändel-

ten Zahn lokal sehr stark verformt (rechts). Der wesentlich härtere Zahn verformt sich dagegen nicht. Die Kräfte werden über den gesamten Einpressweg ausgewertet.

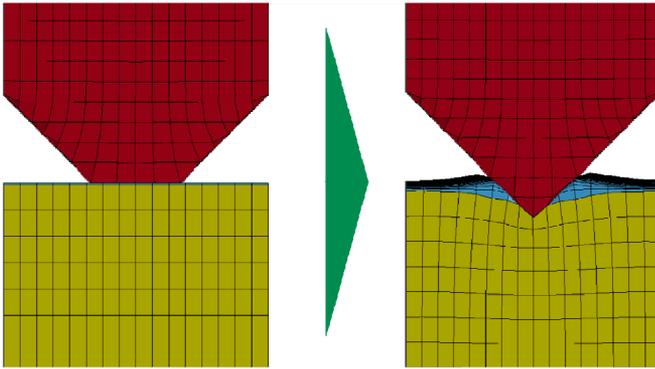


Abbildung 5: Verformung der Nabe (unten) durch einen gerändelten Zahn (oben)

Abbildung 6 zeigt den Vergleich der Radialkräfte aus dem Versuch und der Berechnung. Die Radialkraft F_r ist über den Einpressweg s_e aufgetragen. Es zeigen sich über den gesamten Einpressweg sehr geringe Abweichungen zwischen den beiden Kurven, was bedeutet, dass die Werkstoffeigenschaften sehr gut abgebildet werden.

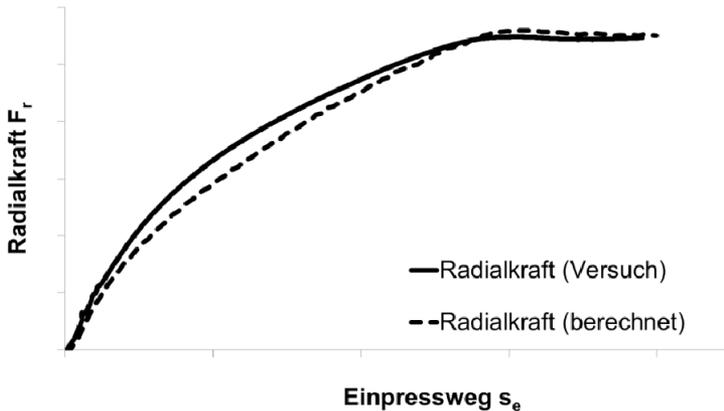


Abbildung 6: Vergleich der Radialkräfte aus Versuch und Berechnung

4 Zusammenfassung

Die gebräuchlichen Werkstoffeigenschaften wie der E-Modul und die Streckgrenze reichen in der Regel aus, um Aussagen zum Versagensverhalten von Bauteilen mittels FE-Berechnungen treffen zu können.

Bei Berechnungen mit großen plastischen Dehnungen, wie z. B. bei Umformsimulationen, reichen diese Größen jedoch nicht aus. Um hier Abhilfe zu schaffen, wurde eine Vorgehensweise vorgestellt, mit der die Fließkurve eines Werkstoffs über einen großen Verformungsbereich ermittelt werden kann. Dabei wird nur auf standardisierte Werkstoffuntersuchungen zurückgegriffen. Die Validierung des Vorgehens zeigt eine sehr gute Vergleichbarkeit zwischen Berechnung und Versuch.

5 Danksagung

Der Autor bedankt sich bei der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) und ihren Mitgliedern für die inhaltliche Betreuung, sowie bei der AiF Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) für die finanzielle Unterstützung des Projekts „Untersuchungen an Pressverbindungen mit gerändelter Welle“.

6 Literatur

- /1/ Norm DIN EN ISO 6892-1 Dezember 2009. Metallische Werkstoffe – Zugversuch
- /2/ Norm DIN 50106 Dezember 1978. Prüfung metallische Werkstoffe, Druckversuch
- /3/ Rust, R.: Nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen. 1. Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner 2009