

Nutzen von Daten in der Umformtechnik – Potenziale der Digitalisierung

Zyklische Scherprüfung metallischer Folien

C. Karadogan, M. Beck, P. Cyron, K. R. Riedmüller, M. Liewald

Die Bemühungen zur Emissionsreduktion in den Bereichen Energie und Mobilität führen zu einer steigenden Nachfrage nach geformten Bauteilen aus dünnen Metallfolien. Die Herstellung und Auslegung solcher Komponenten gestalten sich als äußerst anspruchsvoll. Herkömmliche Charakterisierungsversuche für die digitale Auslegung dieser Bauteile stoßen an ihre Grenzen. Daher wird in diesem Kontext ein innovativer Versuchsaufbau für den zyklischen Scherversuch vorgestellt, der die strukturelle Stabilität der Probe erhöht und eine Modellierung des Verfestigungsverhaltens ermöglicht.

STICHWÖRTER

Brennstoffzelle, Finite-Elemente-Methode (FEM), Simulation

Cyclic shear testing for metallic foils

Efforts to reduce emissions in the fields of energy and mobility lead to an increasing demand for shaped components made from thin metal foils. Manufacturing and designing such components is highly challenging. Conventional characterization tests for designing these components digitally are reaching their limits. In this context, an innovative setup for cyclic shear testing is introduced, enhancing the structural stability of the specimen and enabling modeling of the material's strengthening behavior.

1 Einleitung

Die steigende Nachfrage nach Elektromobilität, Mikroelektronik und erneuerbaren Energien hat zu einer erheblichen Zunahme der Produktionsvolumina für umgeformte Komponenten aus dünnen metallischen Folien (Dicke $\leq 100 \mu\text{m}$) geführt. Solche geringen Materialdicken sind eine enorme Herausforderung für die Machbarkeit und die Robustheit von Umformprozessen, da dünne metallische Folien insbesondere zu Defekten aufgrund von Falten- oder Reierbildung neigen [1–3]. Zudem ist bis heute die Rückfederung eine wesentliche Herausforderung bei der Erreichung dimensionaler Genauigkeit von Bauteilen aus dünnen Metallfolien [4–6]. In modernen Brennstoffzellen beispielsweise kommen Bipolarplatten mit äußerst komplexen Flussfeldgeometrien zum Einsatz, die aus dünnen Edelstahlfolien mittels Hohlprägen hergestellt werden. Die Flussfeldgeometrien beziehungsweise die zugehörigen Strömungskanäle auf diesen geprägten Platten müssen sehr enge Toleranzbereiche innerhalb weniger Mikrometer in vertikaler und lateraler Richtung erfüllen [4, 7]. Andernfalls können aufgrund dimensionaler Ungenauigkeiten Schwierigkeiten beim Fügen oder Stapeln der Bipolarplatten, dem sogenannten Stacking, auftreten, die zu einer verringerten Leistung und Effizienz der gesamten Brennstoffzelle führen.

Finite-Elemente-Simulationen (FE) können zur Auslegung solch komplexer Umformverfahren herangezogen werden, um Verfahrensschritte in einem frühen Entwicklungsstadium zu optimieren. Die Genauigkeit dieser Simulationsergebnisse hängt aber stark von der Modellierung des mechanischen Verhaltens des Materials ab. Dazu werden in der Regel eine Reihe von Charakterisierungsversuchen durchgeführt, welche anschließend in mathematische Formulierungen überführt werden [1, 8]. Um die Vorhersagequalität von FEM-Simulationen, insbesondere bei der zu erwartenden dimensional Genauigkeit und Rückfederung des Bauteils, zu verbessern, empfiehlt es sich, neben Spannungs-Dehnungs-Kurven auch Belastungssequenzen mit Lastumkehr zu berücksichtigen [9]. Das Verhalten bei Lastumkehr kann dann in komplexen phänomenologischen Materialmodellen wie dem Yoshida-Uemori-Modell zur Modellierung der kinematischen Verfestigung [10] oder dem Chaboche-Modell [11–12] berücksichtigt werden. Auf diese Weise ist es möglich, die Materialverfestigung sowie den Bauschingereffekt in der Umformsimulation sehr genau zu berücksichtigen und eine verbesserte Prognose des Rückfederungsverhaltens zu erzielen. Neben dem zyklischen Zug-Druck-Versuch, der für dünne Folien nur wenig praktikabel ist, kann das Materialverhalten bei zyklischer Last beziehungsweise bei Lastumkehr in einem zyklischen In-Plane-Scherversuch [13–14] oder in einem zyklischen In-Plane-Torsionsversuch [15] abgebildet werden.

In diesem Beitrag wird der zyklische In-Plane-Scherversuch an dünnen metallischen Folien im Detail untersucht. Dieser Versuch kann, bei Nutzung einer entsprechenden Vorrichtung, in einer konventionellen Zugprüfmaschine umgesetzt werden und ermöglicht das Abbilden von zyklischen Belastungssequenzen mit Lastumkehr. Typischerweise wird der zyklische In-Plane-Scherversuch (im Folgenden als zyklischer Scherversuch bezeichnet), wie in **Bild 1** dargestellt, durchgeführt.

Um den nachteiligen Einfluss von Spannungsinhomogenitäten in der Nähe der freien Kanten zu verringern, wird lediglich ein

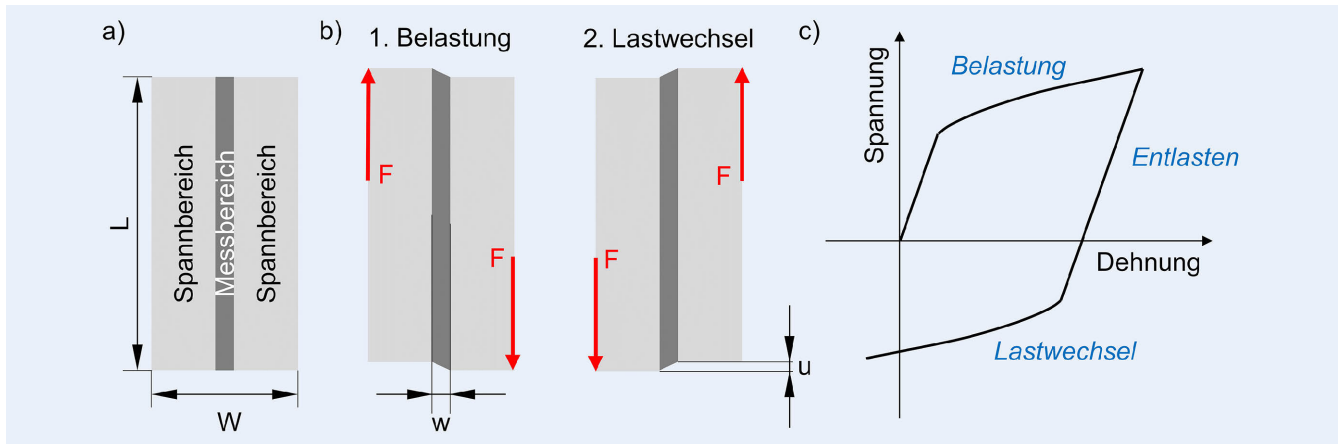


Bild 1. a) Schematischer rechteckiger Probenkörper für den zyklischen Scherversuch mit der Dicke t , L = Probenlänge und W = Probenbreite; b) Probe in Belastungsrichtung und unter Lastumkehr. w = Breite des Messbereichs; c) Schematische Spannungs-Dehnungs-Kurve, die durch den Scherversuch ermittelt wird. Grafik: IFU Universität Stuttgart

schmäler mittlerer Bereich der Probe mit einer zyklischen beziehungsweise einer Scherbelastung in der Ebene (in-plane) mit Lastumkehr beansprucht. Unter der Annahme, dass die geklemmten Bereiche der Probe starr verbleiben und die Inhomogenitäten an den freien Kanten vernachlässigt werden können, werden die auftretende wahre Dehnung und Spannung mittels der Gleichungen (1) und (2) ermittelt.

$$\varepsilon_{v.Mises}^{plastic} = \sqrt{\frac{1}{3}} \varepsilon_{shear}^{plastic} \quad \text{with} \quad \varepsilon_{shear}^{plastic} = \gamma_{xy} - \tau_{xy}/G \quad \text{where} \quad \gamma_{xy} = \frac{u}{w} \quad (1)$$

$$\sigma_{v.Mises} = \sqrt{3} \tau_{xy} \quad \text{with} \quad \tau_{xy} = F/t \cdot L \quad (2)$$

Zur Erfassung der tatsächlich auftretenden Scherdehnung innerhalb des Probenbereichs wird empfohlen, die Dehnungsverteilung mit einer optischen Dehnungsmessung zu erfassen. Außerdem sollte der Spannungszustand im Messbereich der Probe idealerweise ein ebener sein. Dies ist im Falle von Faltenbildung nicht gewährleistet. Daher muss die Faltenbildung im Messbereich der Probe unbedingt unterbunden werden.

Konventionelle Vorrichtungen für Scherversuche mit einem breiteren Messbereich (wenige Millimeter breit) eignen sich nicht zur Charakterisierung von dünnen Metallfolien, da diese aufgrund ihrer geringen strukturellen Stabilität zur Bildung von Falten und Reißern neigen [1–3]. Vor allem beim Auftreten von Falten im Messbereich liegt der geforderte ebene Spannungszustand, nämlich eine reine Scherbeanspruchung, nicht mehr vor und es kommt zu einer Überlagerung verschiedener Spannungszustände. Eine Ermittlung der Scherspannungen und -dehnungen nach Gleichung (1) und (2) ist dann nicht mehr zulässig. Um die strukturelle Stabilität der metallischen Folie und insbesondere des Messbereichs sicherzustellen, muss die Breite des Messbereichs w proportional zur Materialdicke reduziert werden. Eine solche proportionale Reduktion der Breite des Messbereichs würde im Fall von dünnen metallischen Folien dazu führen, dass sie für herkömmliche optische Messsysteme zu klein ist.

Diese Herausforderungen haben zur Entwicklung neuer Ansätze für die Durchführung zyklischer Scherversuche an dünnen metallischen Folien geführt. Sie wurden in zahlreichen For-

schungsarbeiten vorgestellt und befassen sich hauptsächlich mit dem Problem der Faltenbildung im Messbereich [9, 16].

Ein Lösungsansatz, um die Faltenbildung während des Scherversuchs zu unterbinden, besteht darin, einen Normaldruck im Messbereich der Probe mithilfe einer sogenannten Anti-Falten-Vorrichtung aufzubringen. Hierzu verwenden Pham *et al.* [9] transparente Platten aus Plexiglas, die während des zyklischen Scherversuchs einen Normaldruck auf den Messbereich der metallischen Folie bewirken. Nach Aussage der Autoren kann auf diese Weise die Faltenbildung effektiv vermieden werden, während gleichzeitig optische Dehnungsmessungen aufgrund der transparenten Platten möglich sind.

Dennoch sind die Anbringung solcher Vorrichtungen zur Vermeidung von Faltenbildung, das genaue Aufbringen einer definierten Flächenpressung innerhalb des Messbereichs sowie das Einsetzen der Probe und der Anti-Falten-Vorrichtung in den Prüfstand bedeutende Herausforderungen. Insbesondere wenn die geringe strukturelle Stabilität von dünnen metallischen Folien bedacht wird. Obwohl die Autoren gezeigt haben, dass die Reibung zwischen der Spannvorrichtung und der Folie keinen wesentlichen Einfluss auf die gemessene Kraft hat, werden keine konkreten Angaben zum Einfluss der Reibung auf das stochastische Muster auf der Probenoberfläche gemacht [9]. Dieses stochastische Muster ist nötig, um die Dehnungen mittels einer optischen DIC (Digital Image Correlation)-Dehnungsmessung erfassen zu können. Es wird angenommen, dass die auftretende Reibung zwischen der transparenten Plexiglasplatte und dem aufgedruckten beziehungsweise lackierten stochastischen Muster die Messung des Verzerrungsfeldes verzerren kann.

Basierend auf dem aktuellen Stand der Technik stellt dieser Beitrag eine neuartige Prüfvorrichtung zur Durchführung von zyklischen Scherversuchen an dünnen metallischen Folien vor. Die vorgeschlagene Prüfmethode verbessert die strukturelle Stabilität der Scherprobe im Messbereich und verhindert auf diese Weise die Faltenbildung während des Versuchs, ohne dass eine zusätzliche Vorrichtung zur Unterdrückung von Falten erforderlich ist. Die strukturelle Stabilität wird durch eine leichte Krümmung des Messbereichs erzielt, wodurch die Neigung zur Faltenbildung drastisch reduziert wird. Auf diese Weise wird eine konventionelle optische Dehnungsmessungen ermöglicht und die

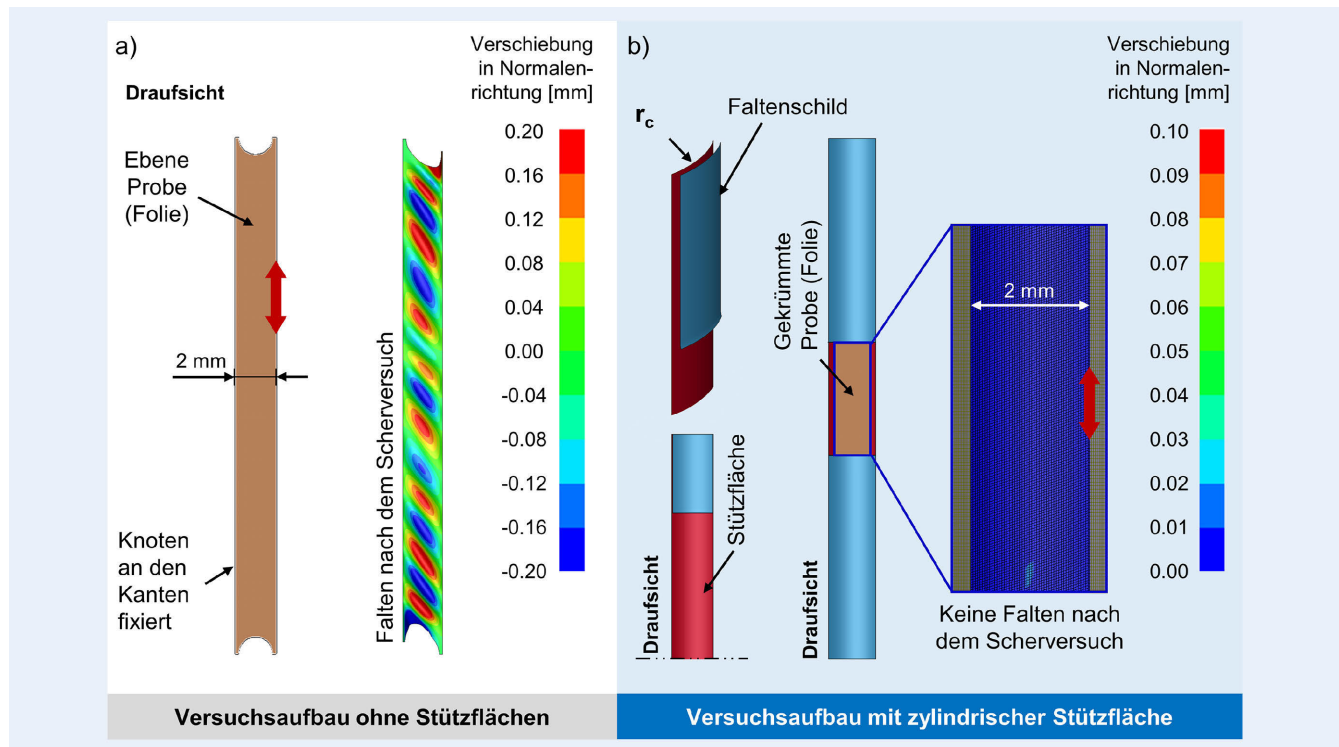


Bild 2. a) Simulationsmodell für den konventionellen Scherversuch, b) Simulationsmodell mit dem neuen Prüfaufbau in isometrischer Ansicht und Draufsicht. Grafik: IFU Universität Stuttgart

Notwendigkeit einer Vorrichtung zur Vermeidung von Falten entfällt. Zudem können auf diese Weise potenzielle Reibungseffekte zwischen einem potenziellen stochastischen Muster auf dem Messbereich und einer zusätzlichen Vorrichtung unterbunden werden.

Zur Prüfung dieses neuartigen Ansatzes wurden Finite-Elemente-Simulationen mit „LS-Dyna“ durchgeführt. Zunächst wurden die Simulationen darauf ausgerichtet, das Auftreten von Falten in konventionellen Scherversuchen nachzubilden, um geeignete numerische Parameter zu erhalten. Für die Simulation kam ein Materialmodell für einen austenitischen Edelstahl (1.4404/316L) mit einer Dicke von 100 μm zum Einsatz [4]. Anschließend wurden Untersuchungen mit geeigneten Werkzeugwirkflächen und Stützflächen sowie einem gekrümmten Messbereich durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass eine leichte Krümmung des Messbereichs der Folie die Faltenbildung im Messbereich effektiv unterdrücken konnte. Darüber hinaus ergab eine Analyse der resultierenden Kräfte und der Verschiebungen beziehungsweise Dehnungen, dass die geringen Biegespannungen, die in die Probe eingebracht werden, keine signifikanten Auswirkungen auf die gemessenen Kräfte haben und daher keine nachteiligen Auswirkungen auf die Messergebnisse zu erwarten sind.

2 FE-Modellierung des zyklischen Scherversuchs und numerische Studien

Um die auftretende Faltenbildung während konventioneller Scherversuche an dünnen metallischen Folien zu eliminieren, wurde in den vorliegenden Untersuchungen ein neuer Prüfaufbau verwendet, der die Scherprobe leicht krümmt und dadurch ihre strukturelle Stabilität während der Belastungsphasen erhöht, ohne dass zusätzliche Vorrichtungen auf den gesamten Messbereich

einwirken. Die Hypothese, dass Faltenbildung bei dünnen metallischen Folien durch eine leichte Krümmung der Vorrichtung während des Scherversuchs verhindert werden kann, wurde durch eine Simulation für einen Messbereich von 2×30 mm (siehe Bild 1) an einer Probe aus Edelstahl (1.4404/316L) mit einer Foliendicke von 0,1 mm geprüft. Dafür wurden zwei Simulationen mit LS-Dyna durchgeführt: eine mit dem konventionellen Ansatz unter Verwendung einer flachen Scherprobe und eine zweite mit dem vorgeschlagenen Ansatz, bei dem die Probe mit einer leichten Krümmung von $r_c = 5$ mm versehen wurde und von hinten durch eine starre zylindrische Stützfläche im Messbereich gestützt wurde (Bild 2b) rote Fläche). Eine solche unterstützende Fläche von einer Seite ist sowohl für die Einbringung der geringfügigen Biegung als auch für die Beibehaltung der gekrümmten Form der Probe beim Durchführen der Scherprüfung notwendig. Die beiden verwendeten Simulationsmodelle sind in Bild 2 dargestellt, wobei das verwendete Materialmodell MAT-36 auf Daten aus [4] basiert. Die Simulationen wurden mit Schalenelementen des Typs 16 durchgeführt, die 11 Integrationspunkte in Richtung der Foliendicke umfassen.

Bild 2 stellt die Prüfkörper beziehungsweise Folienproben in brauner Farbe dar. Die beiden virtuellen Scherversuche wurden einer identischen zyklischen Scherbeanspruchung ausgesetzt. In Bezug auf die gewählte Breite des Messbereichs verformte sich die Probe zunächst mit einer Scherdehnung von $\gamma = 0,3$ nach oben und dann in umgekehrter Richtung bis zu einer Scherdehnung von $\gamma = -0,3$ (wobei $\gamma_{xy} = 2\varepsilon_{xy}$). In den FE-Modellen werden die Knoten außerhalb des Messbereichs, die in den realen Tests durch Spannbacken fixiert werden, durch knotenbasierte Randbedingungen gesperrt oder in die entsprechenden Richtungen bewegt, um die Scherdeformation herbeizuführen.

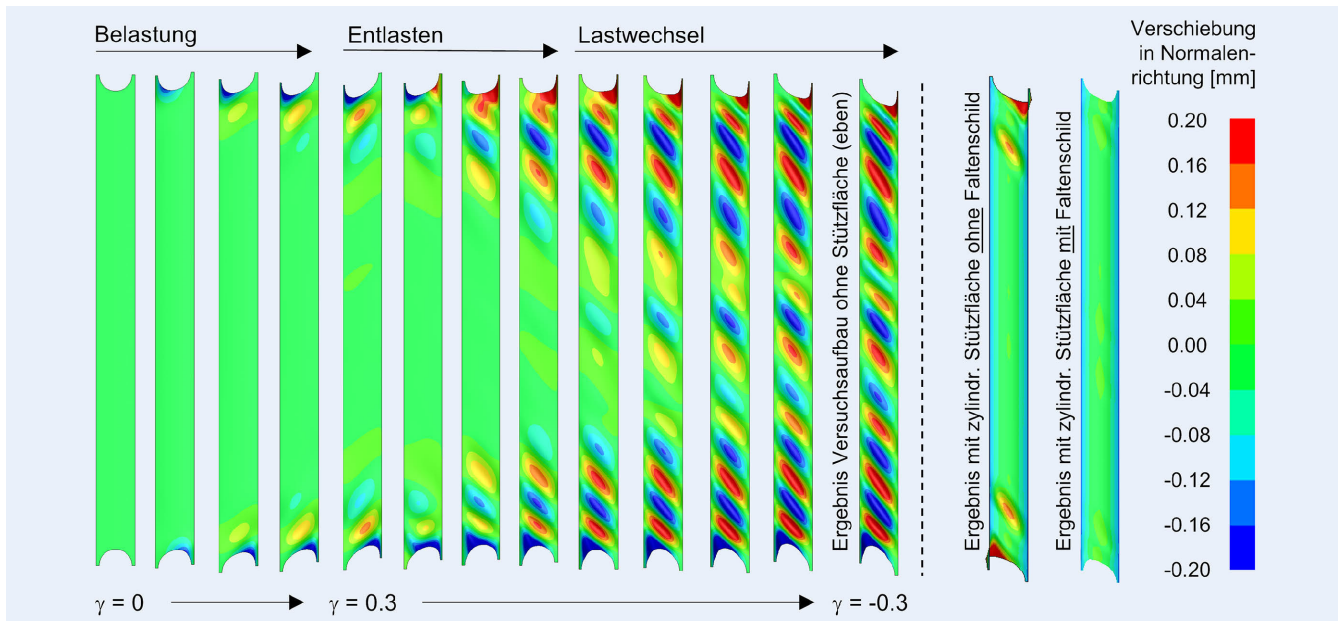


Bild 3. Vergleich der Faltenbildung und des -wachstums während des Scherversuchs mit freiem und ebenem Messbereich entsprechend Aufbau Bild 2a) und finales Ergebnis mit Aufbau Bild 2b) mit zylindrischer Stützfläche. Grafik: IFU Universität Stuttgart

Der konventionelle ebene Scherversuch (Bild 2 a) zeigte dabei eine starke Faltenbildung im Messbereich, die den beabsichtigten Spannungszustand stark verfälschte. Eine zuverlässige Messung der reinen Scherdehnung mit einem optischen Messsystem wäre in diesem Fall nicht gewährleistet. Der modifizierte Scherversuch gemäß Bild 2 b) weist eine zylindrische Stützfläche mit einem Radius von $r_c = 5$ mm auf, welche sich auf der Rückseite des Messbereichs befindet. In der Simulation wurde der Messbereich der Probe (braun) mithilfe dieser zylindrischen Stützfläche in einem ersten Schritt leicht gekrümmt. Das Einbringen dieser Krümmung beziehungsweise dieses initiale Biegen wurden in der FEM-Simulation ebenfalls simuliert. So werden die Auswirkungen der geringfügig eingebrachten Spannungen, welche durch die Biegung entstehen, über die 11 Integrationspunkte in der Dickenrichtung berücksichtigt. Die Vorderseite der Probe blieb dabei frei von jeglichem Werkzeugkontakt. Es wurden lediglich zwei ebenfalls zylindrische Flächen (in Bild 2 b) in blau dargestellt) oberhalb und unterhalb des Messbereichs in einem geringen Abstand zur Probenoberfläche positioniert. Diese zylindrischen Flächen, auch Faltschilder genannt, sind so konstruiert, dass das Wachstum von Falten, das normalerweise am oberen und unteren Rand des Messbereichs aufgrund der Belastung initiiert wird, auf eine unkritische maximale Höhe begrenzt wird.

Umfangreiche Simulationen im Rahmen dieser Studie haben gezeigt, dass das Begrenzen des Faltenwachstums im oberen und unteren Bereich der Probe (die nicht zwingend zur Bewertung der Scherdehnung durch das optische System verwendet werden) eine weitere Ausbreitung von Falten in den zentralen Messbereich der Probe unterbinden. Der zentrale Messbereich der Probe kann dabei nach wie vor für eine optische Messung der sich einstellenden Dehnungen genutzt werden. Es kann angenommen werden, dass der visuell freie Messbereich der Probe repräsentativ für den kompletten Messbereich gültig ist. Ein faltenfreier mittlerer Messbereich kann auch durch den alleinigen Einsatz der gekrümmten Stützfläche erreicht werden (siehe unten Bild 3).

3 Diskussion der Ergebnisse

Die Simulationsergebnisse zeigen, wie in Bild 2 a) dargestellt, dass es beim konventionellen Scherversuch zu einer übermäßigen Faltenbildung in der flachen Probe kommt. Im Gegensatz dazu ist im Messbereich der leicht gekrümmten Probe, wie Bild 2 b) zeigt, keine Faltenbildung zu beobachten. Dies resultiert aus der erhöhten strukturellen Stabilität des belasteten Querschnitts der Probe gegenüber Faltenbildung. Die Verwendung von sogenannten zusätzlichen Faltschildern kann mit der nachfolgenden Argumentation gerechtfertigt werden: Die Faltenbildung wird beim zyklischen Scherversuch in den freien Kanten am oberen und unteren Ende des Messbereichs, wie in **Bild 3** dargestellt, initiiert.

Diese Falten propagieren anschließend mit zunehmender Scherdehnung in den Bereich der Probenmitte beziehungsweise in die Mitte des Messbereichs. Durch eine Begrenzung der Höhe der initialen Falten durch sogenannte Faltschilder kann ein weiteres Anwachsen sowie Propagieren der Falten verhindert werden. Dabei wird initial kein Druck auf die Probenoberfläche aufgebracht und erst im weiteren Verlauf des Scherversuchs werden Falten im Messbereich durch eine lokale und leichte Berührung unterbunden. Der Einfluss der Faltschilder auf das finale Ergebnis ist hierbei marginal, wie im weiteren Verlauf der Untersuchungen gezeigt wird.

Um sicherzustellen, dass die leichte Krümmung des Messbereichs der Probe vernachlässigbare Auswirkungen auf die Messgenauigkeit und die Auswertung von Schubspannungen und -dehnungen hat, wurden die Kräfte und die Verschiebungen sowohl aus dem konventionellen Scherversuch (siehe Bild 2 a) und aus dem neuen Ansatz mit gekrümmten Messbereich (siehe Bild 2 b) miteinander verglichen. Für einen geeigneten Vergleich wurde zusätzlich eine ideelle Probe mit ebenem und freiem Messbereich ohne Stützfläche herangezogen. In dieser ideellen Version wird die Faltenbildung durch das Sperren des Freiheitsgrades senkrecht zur Probenoberfläche verhindert. Ein Vergleich der resultierenden Kräfte im ideellen, im konventionellen und im

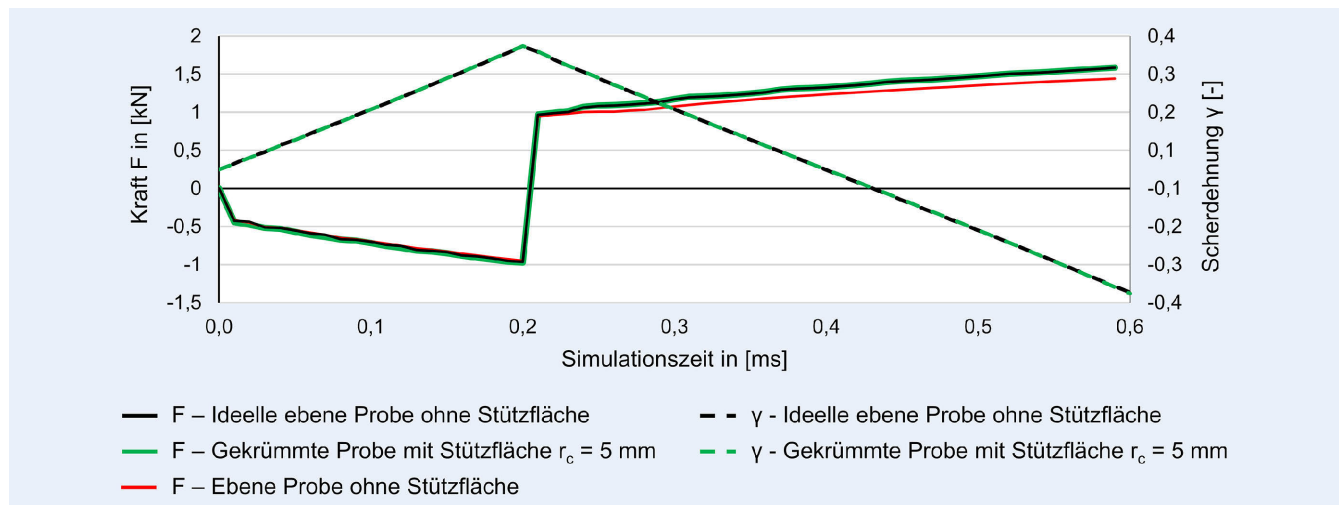


Bild 4. Vergleich der berechneten Kraftwerte und der Scherdehnungen für eine ideale ebene Probe mit einer gekrümmten Probe mit Stützfläche und mit einer ebenen Probe ohne Stützfläche. Grafik: IFU Universität Stuttgart

neuen Versuchsaufbau mit gekrümmtem Messbereich ist in **Bild 4** dargestellt.

Es zeigt sich, dass sich zwischen den Kraftverläufen der idealen Version und dem Versuchsaufbau mit gekrümmtem Probenbereich nur eine vernachlässigbare Abweichung einstellt. Im Gegensatz zur konventionellen ebenen Probe (rote Kurve in Bild 4) zeigt die gekrümmte Probe einen nahezu gleichen Kraftverlauf, wie auch die Probe im ideellen Szenario. Außerdem zeigen die Scherdehnungen γ , die auf Grundlage der Knotenverschiebungen der Probe in der Simulation berechnet werden, keine signifikanten Unterschiede zwischen der gekrümmten und der idealisierten Probe.

Die Ergebnisse zeigen, dass der vorgeschlagene neue Prüfaufbau mit einem gekrümmten Probenbereich eine effektive Methode zur Reduktion der Faltenbildung beim Scherversuch an dünnen metallischen Folien ist.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag präsentiert einen neuartigen Ansatz zur Durchführung von zyklischen Scherversuchen an dünnen metallischen Folien. Durch die Einführung einer leichten Krümmung der Probe im Messbereich kann die Bildung unerwünschter Falten vermieden werden, wodurch eine zuverlässige Messung und Berechnung von Schubspannungen und -dehnungen im Messbereich möglich wird. Zur Überprüfung dieses Ansatzes wurden Finite-Elemente-Simulationen unter Verwendung vom LS-Dyna durchgeführt, um den Machbarkeitsnachweis zu erbringen.

Die Simulationen konventioneller Scherversuche zeigten, dass die Faltenbildung in der Regel an den freien Kanten des Messbereichs der Probe oben und unten beginnt und sich anschließend nach innen ausbreitet. Durch die Krümmung des Messbereichs der Probe in eine leicht zylindrische Form unter Verwendung einer Stützfläche und die zusätzliche Nutzung sogenannter Faltschilder wird ein faltenfreier Messbereich sichergestellt, der optisch zuverlässig vermessen werden kann. Ein Vergleich der Kraft- und Scherdehnungsverläufe der unterschiedlichen Versuchsaufbauten hat gezeigt, dass die beim Krümmen der Probe auftretende Biegespannung keinen Einfluss hat und daher vernachlässigt werden kann (siehe Bild 4). Zukünftige Arbeiten

werden sich auf weitere Untersuchungen mit unterschiedlichen Biegeradien sowie mit verschiedenen Folienmaterialien unterschiedlicher Dicke konzentrieren. Zur Validierung des vorgeschlagenen Konzepts wird eine geeignete Testeinrichtung für experimentelle Untersuchungen aufgebaut werden.

DANKSAGUNG

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Arbeitskreises „Folienumformung“ am Institut für Umformtechnik sowie im Rahmen des trilateralen Transferprojekts AKS-Bipolar der DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) und der Fraunhofer-Gesellschaft (DFG-Projekt 460294948) durchgeführt. Die Autoren danken der DFG und dem Arbeitskreis Folienumformung für Ihre Unterstützung.

Literatur

- [1] Vollertsen, F.; Biermann, D.; Hansen, H.N. et al.: Size effects in manufacturing of metallic components. *CIRP Ann Manuf Technol* 58 (2009) 2, pp. 566–587
- [2] Neto, D. M.; Oliveira, M. C.; Alves, J. L. et al.: Numerical study on the formability of metallic bipolar plates for proton exchange membrane (PEM) fuel cells. *Metals* 9 (2019) 7, # 810
- [3] Hu, Q.; Zhang, D.; Fu, H. et al.: Investigation of stamping process of metallic bipolar plates in PEM fuel cell – numerical simulation and experiments. *International Journal of Hydrogen Energy* 39 (2014) 25, pp. 13770–13776
- [4] Beck, M.; Riedmüller, K. R.; Liewald, M. et al.: Investigation on the influence of geometric parameters on the dimensional accuracy of high-precision embossed metallic bipolar plates. In: Liewald, M. (Hrsg.): *Production at the Leading Edge of Technology. Proceedings of the 12th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP)*, Stuttgart, 2022 pp. 427–438
- [5] Bauer, A.: Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Analyse der umform-technischen Herstellung metallischer Bipolarplatten. Dissertation, TU Chemnitz, 2020
- [6] Adzima, F.; Balan, T.; Manach, P.Y.: Springback prediction for a mechanical micro connector using CPFEM based numerical simulations. *International Journal of Material Forming* 13 (2020) pp. 649–659
- [7] Porstmann, S.; Wannemacher, T.; Drossel, W. G.: A comprehensive comparison of state-of-the-art manufacturing methods for fuel cell bi-

- polar plates including anticipated future industry trends. *Journal of Manufacturing Processes* 60 (2020) pp. 366–383
- [8] Vollertsen, F.; Schulze Niehoff, H.; Hu, Z.: State of the art in micro forming. I *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 46 (2006) 11, pp. 1172–1179
- [9] Pham, C.; Adzima, F.; Coër, J. et al.: Anti-buckling device for ultra-thin metallic sheets under large and reversed shear strain paths. *Experimental Mechanics* 57 (2017) pp. 593–602
- [10] Yoshida, F.; Uemori, T.: A model of large-strain cyclic plasticity and its application to springback simulation. *International Journal of Mechanical Sciences* 45 (2003) 10, pp. 1687–1702
- [11] Chaboche, J.L.: Time-independent constitutive theories for cyclic plasticity. *International Journal of Plasticity* 2 (1986) 2, pp. 149–188
- [12] Chaboche, J.L.: Constitutive equations for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity. *International Journal of Plasticity* 5 (1989) 3, pp. 247–302
- [13] Bouvier, S.; Haddadi, H.; Levée, P. et al.: Simple shear test: experimental techniques and characterization of the plastic anisotropy of rolled sheets at large strains. *Journal of Materials Technology* 172 (2006) pp. 96–103
- [14] Yin, Q.; Zillmann, B.; Suttner, S. et al.: An experimental and numerical investigation of different shear test configurations for sheet metal characterization. *International Journal of Solids and Structures* 51 (2014) 5, pp. 1066–1074
- [15] Brosius, A.; Yin, Q.; Güner, A. et al.: A new shear test for sheet metal characterization. *Steel Research International* 82 (2011) 4, pp. 323–328
- [16] Zhang, P.; Pereira, M. P.; Abeyrathna, B. et al.: Improving the shear test to determine shear fracture limits for thin stainless steel sheet by shape optimisation. *International Journal of Mechanical Sciences* 164 (2019), #105116



Dr. sc. techn. **Celalettin Karadogan**
Foto: IFU Stuttgart

Maxim Beck, M.Sc.

Patrick Cyron, M.Sc.

Dr.-Ing. **Kim Rouven Riedmüller**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. **Mathias Liewald** MBA
Institut für Umformtechnik (IFU), Universität Stuttgart
Holzgartenstr. 17, 70174 Stuttgart
Tel. +49 711 / 985-838 40
sekretariat@ifu.uni-stuttgart.de
www.ifu.uni-stuttgart.de

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)