

# Numerische Modelle mechanischer Prüfverfahren in der Schuhindustrie

M. Q. Pham<sup>1</sup>, T. Gereke<sup>1</sup>, T. Knierim<sup>2</sup>, P. Schultheis<sup>2</sup>, C. Cherif<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM), 01062 Dresden

<sup>2</sup> Prüf- und Forschungsinstitut Pirmasens, Marie-Curie-Straße 19, 66953 Pirmasens

Kontakt: [thomas.gereke@tu-dresden.de](mailto:thomas.gereke@tu-dresden.de), [thorsten.knierim@pfi-germany.de](mailto:thorsten.knierim@pfi-germany.de)

**Abstract.** In vielen Bereichen ist heutzutage bei der Entwicklung von neuen Produkten der Einsatz von Computern und deren Software unentbehrlich. Auch in der Schuhindustrie sind CAD-Verfahren zur Modellentwicklung nicht mehr wegzudenken. Simulationstechniken bieten darüber hinaus die Möglichkeit, bestehende Produkte zu optimieren und neue Produkte effizienter und kostengünstiger als bisher zu entwickeln. Mittels moderner Simulationssoftware kann durch den Schuhentwickler nahezu unabhängig von Material und Geometrie ein realitätsnahes Modell zur Simulation eines Produktes erstellt werden. Im Rahmen des Projekts „Modellentwicklung am Beispiel mechanischer Prüfverfahren zum Einsatz numerischer Simulation in der Schuhindustrie“ (IGF-Vorhaben Nr. 19657 BG) wurden die Modellierungsmethodik einiger typischer Schuhprüfungen entwickelt und validiert. Aus zahlreichen Prüfungen wurden die Energieaufnahme der Sohle, die Ermittlung der Nahtfestigkeit, die Prüfung der Durchtrittsicherheit sowie der Biegeeigenschaften von Einlagen ausgewählt. Als Referenz wurden die experimentellen Prüfmethode weiterentwickelt, Prüfungen durchgeführt sowie Ergebnisse analysiert. Als Kernergebnisse der Forschung sind die validierten Modelle zur Simulation mechanischer Belastungen am Schuh sowie eine Materialdatenbank typischer, im Schuh verwendeter Materialien anzusehen.

## 1 Einleitung

Schuhe werden im alltäglichen Gebrauch verwendet und je nach Einsatzbereich z. B. in Wander-, Sport-, Schutz- oder Sicherheitsschuhe mit den unterschiedlichsten Anforderungen unterschieden. Der Bereich der Schutz- und Sicherheitsschuhe liegt auch durch die mannigfaltigen Einsatzbedingungen besonders im Fokus der Aufmerksamkeit. Schuhe für technische Anwendungen werden durch die KMU bisher überwiegend auf Erfahrungsbasis und per Trial-and-Error-Verfahren entwickelt. Während des Entwicklungsprozesses durchlaufen die Schuhe eine Vielzahl von genormten Prüfungen zur Absicherung der anwendungsbezogen stark unterschiedlichen technischen Merkmale. Dies geschieht leider oft mehrmals, falls ein erster Entwurf die Anforderungen nicht erfüllt oder es kommt aufgrund der Unsicherheiten der Entwickler häufig zu einer Überdimensionierung der sicherheitsrelevanten Komponenten. Zudem kann das Leistungspotenzial neuer Materialien und Materialkombinationen bisher bei Weitem nicht ausgeschöpft werden, da hierfür wenige Erfahrungswerte existieren und die Integration solcher Materialien in die Trial-and-Error-basierten Prozesse ein hohes Kostenrisiko birgt. Dieses bisherige Vorgehen bei der Schuhentwicklung ist mit hohem Aufwand für die notwendige Fertigung von Musterschuhen und deren Prüfung verbunden. Beispielsweise müssen immer wieder Entwürfe der Designer verworfen werden, da nach Bau

und Prüfung von Musterexemplaren festgestellt wird, dass die mechanische Stabilität nicht ausreichend ist. Solche Fehlentwicklungen führen für die KMU natürlich auch zu hohen Kosten. Die Möglichkeit, die mechanische Belastbarkeit von Schuhen unter Verwendung moderner Simulationsverfahren zu analysieren, wird bisher insbesondere von den KMU nicht genutzt, da dort entsprechend geschulte Mitarbeiter und geeignete Simulationsmodelle fehlen. Solche Modelle und standardisierte Prozesse sind aber die Basis für eine Verlagerung von Simulationsaufgaben von den Berechnungsspezialisten hin zu den bereits heute in den KMU angestellten Konstrukteuren. Die KMU der deutschen Schuhbranche benötigen deshalb eine Materialdatenbank und Berechnungsmodelle, um neue Schuhmodelle zukünftig kostensparend simulationsgestützt zu entwickeln. Mit einer solchen anwenderfreundlichen und automatisierten Berechnung kann der Konstrukteur seinen Entwurf in kurzer Zeit eigenständig prüfen, Problembereiche erkennen und die Entwürfe entsprechend anpassen. Das Ziel ist, solche standardisierten Berechnungsprozesse zusammen mit einer entsprechenden Materialdatenbank und verbesserten Prüfmethode zu entwickeln, zu validieren und anzuwenden. Um eine gleichbleibende Qualität der Schuhe und der verwendeten Materialien zu gewährleisten, entstanden verschiedene Normprüfungen. Damit können schuhspezifische Eigenschaften ermittelt und die Einhaltung von Qualitätsstandards überprüft werden [1,2]. Aufgrund der hohen Investitionskosten für Prüfmaschinen, Prüfräume und Laborpersonal wenden sich viele Hersteller und Zulieferer der Schuhindustrie an zertifizierte Prüflabore. Diese können in klimatisierten und komplett ausgerüsteten Laboren standardisierte Prüfungen von Werkstoffen und Schuhen unterschiedlicher Art durchführen und sind oft auch zur Ausstellung von Qualitätszertifikaten berechtigt [3,4]. Je nach Schuhgröße und Material gibt es eine Vielzahl von Prüfungen, weshalb Simulationen unerlässlich sind, um eine Vorauswahl von Materialien und Materialkombinationen zu treffen, Potenziale abzuleiten und damit den Prüfaufwand deutlich zu reduzieren. Aufgrund ihrer besonderen Relevanz für die Schuhentwicklung werden die folgenden physikalischen und biomechanischen Prüfungen hier näher betrachtet [5]:

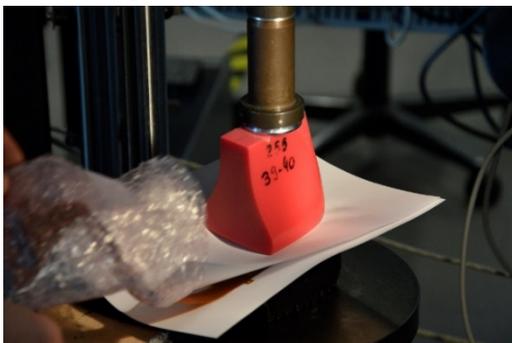
- Energieaufnahme im Fersenbereich (DIN EN ISO 20344 [6])
- Nahtfestigkeit (DIN EN 17697 [7] bzw. PFI-Standardmethode)
- Biegefestigkeit von durchtrittsicheren Einlagen (DIN EN 12568 [8])
- Durchtrittsicherheit (DIN EN ISO 20344)

## **2 Mechanische Schuhprüfungen**

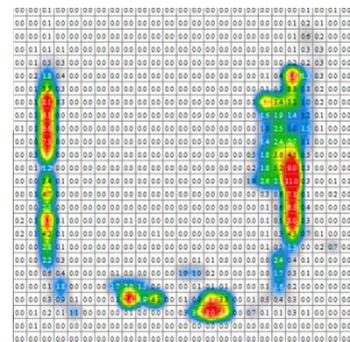
### **2.1 Prüfung der Energieaufnahme im Fersenbereich**

Bei der Prüfung nach DIN EN ISO 20344 [6] wird ein Prüfstempel aus Polyethylen, der die Form des hinteren Teils eines Normleistens hat, in den Fersenbereich des zu prüfenden Schuhs gedrückt. Aus der aufgewendeten Kraft und dem zurückgelegten Weg wird die Energieaufnahme berechnet. Diese Norm-Prüfung gibt dem Hersteller lediglich einen absoluten Wert für das Energieaufnahmevermögen des Prüflings. Für eine bessere konstruktive Anpassung des Fersenbereichs an die entstehenden Belastungen sind jedoch zusätzlich Informationen über die Druckverteilung notwendig.

Neben der benötigten und vorhandenen Versuchseinrichtung (Universalprüfmaschine inkl. unterer Auflageplatte und oberer Leistendruckstempel) wurden eine entsprechende elektronische Druckmessfolie (Sensor Products Inc., Madison, NJ, USA) zur erweiterten Messdatenerfassung verwendet. Der maximale Messbereich der Folie beträgt 10 bar. Um die Druckverteilung zwischen dem Prüfstempel und dem Untergrund (Schuhsohle bzw. Plattenmaterial) zu bestimmen, wurde die Druckmessfolie zwischen den beiden Lagen angebracht (siehe Abbildung 2-1a). Folglich befand sich unter dem Prüfstempel die Druckmessfolie, die zwischen zwei Papierblätter angebracht war, um ein Abknicken der Folie vor allem bei der Verwendung von Schuhsohlen zu verhindern. Unter der Druckmessfolie wurde der Prüfling angebracht. Nach dem Aufbau des Prüfsetups, wurden die Prüfungen in Anlehnung an die DIN EN ISO 20344 durchgeführt. Aufgrund der unterschiedlichen Geometrien des Fußbettes bzw. der Brandsohle der Schuhe sowie des Druckstempels, entstanden im Randbereich hohe Drücke. Schon bei einer Prüfstempelkraft von ca. 500 N wurden von der Druckmessfolie Druckwerte größer 10 bar gemessen.



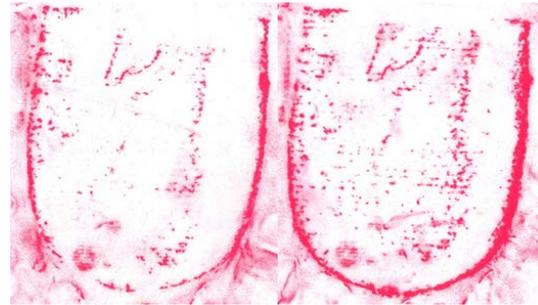
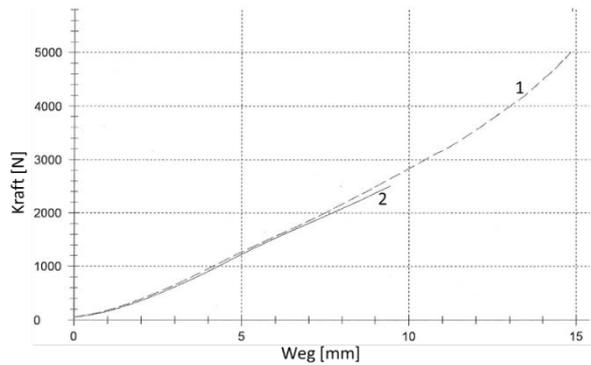
(a)



(b)

Abbildung 2-1: a) Druckversuch mit Prüfstempel (PUR orange Shore A 70) und Druckmessfolie, b) Druckverteilung bei ca. 500 N

Um das Abdruckverhalten des Prüfstempels im Schuh zu verdeutlichen, wurden weitere Versuche mit der Prescale Druckmessfolie (Fujifilm Europe GmbH aus Düsseldorf) durchgeführt. Diese Einwegfolie hat einen Druckbereich von 5 bar bis 25 bar. Wird die Folie in diesem Druckbereich belastet, verfärben sich die Berührungspunkte rot. Die Einweg-Druckmessfolie wurde genauso wie die elektronische Druckmessfolie im Prüfaufbau integriert. Der Versuch mit der Einweg-Druckmessfolie wurde mit einer maximalen Stempelkraft von jeweils 2500 N und 5000 N durchgeführt (siehe Abbildung 2-2a). Die aufgenommenen Messdaten zeigen einen linearen Verlauf der Kraftzunahme im Fersenbereich des Schuhs. Bei einer Kraft von 5000 N auf den Prüfstempel wird der Schuh im Fersenbereich um ca. 15 mm gestaucht. Des Weiteren zeigen die Aufnahmen der Druckmessfolie in welchen Bereichen der Prüfstempel die Kräfte auf den Schuh überträgt (siehe Abbildung 2-2b).



(a)

(b)

Abbildung 2-2: a) Kraft-Weg-Kurven; Einweg-Druckmessfolie im Schuh; 1: bis 5000 N; 2: bis 2500 N b) mit Prescale Druckmessfolie bestimmte Druckverteilung bei 2500 N (links) und 5000 N Prüfkraft (rechts)

Die auftretenden Kräfte werden vor allem im Randbereich des Prüfstempels übertragen. Auch bei einer Prüfkraft von 5000 N erhöht sich die Flächenpressung zwischen Schuh und Prüfstempel nur marginal. Aufgrund der hohen Druckbelastungen wurden die weiteren Versuche mithilfe von Plattenmaterialien durchgeführt. Die Versuche wurden mit PUR-Plattenmaterialien durchgeführt, die von der Beschaffenheit und den unterschiedlichen Shore-A Härtegraden auch bei der Schuhherstellung zum Einsatz kommen. zeigt einen Versuch, der mit einem PUR-Plattenmaterial (Dicke = 10 mm) durchgeführt wurde. Wie in Abbildung 2-3 zu erkennen, werden vor allem im Randbereich des Druckstempels hohe Drücke (rote Bereiche) aufgezeichnet. Diese liegen im Bereich > 10 bar bei einer Kraftbelastung des Druckstempels von ca. 1900 N. Grundsätzlich ist bei dem Plattenmaterial eine wesentlich bessere Druckverteilung über die Prüfstempelfläche zu beobachten, als bei den Versuchen im Schuh (siehe Abbildung 2-3). In einem weiteren Versuch wurde die Shorehärte des Plattenmaterials aus 70 Shore A erhöht. Die maximalen Drücke bei Versuchsende lagen bei ca. 9 bar. Die beiden Versuche mit den Plattenmaterialien und der elektronischen Druckmessfolie zeigen somit, dass sich schon bei einer Änderung der Materialhärte von 5 Shore A, eine bessere Verteilung der Druckkraft des Stempels auf den Untergrund ergibt. Die Druckspitzen, vor allem im Randbereich, fallen um 1 bar von ca. 10 bar auf ca. 9 bar.

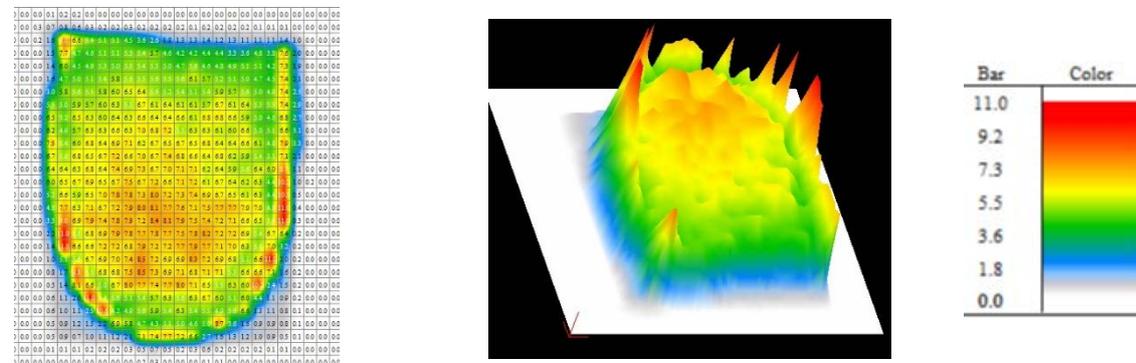


Abbildung 2-3: Ergebnisse Druckversuch mit Druckmessfolie bei 1900 N mit PUR-Plattenmaterial (weiß); Shorehärte: A 65

## 2.2 Prüfung der Nahtfestigkeit

Zur Prüfung der Nahtfestigkeit werden als Referenz zwei geometrisch identische Materialien definiert zusammengenäht und in einer Universalprüfmaschine auf ihre maximale Haltekraft geprüft. Um eine gute Reproduzierbarkeit der Naht bei verschiedenen Prüflingen zu erreichen, werden immer dieselbe Nadel und derselbe Faden verwendet. Um das Verfahren zur Bestimmung der Nahtfestigkeit zu vereinfachen, wurde am PFI ein sogenannter „Kamm“ entwickelt (siehe Abbildung 2-4a) [9], der die durch den Nähvorgang im Prüfling entstehenden Löcher simuliert, durch die sonst der Faden gezogen wird.

Zu Beginn wurden Probekörper nach DIN 17697 hergestellt (siehe Abbildung 2-4b). Dieser wurde am breiteren Teil mit einem „Kamm“ aus Nadeln durchstochen und am unteren Ende mit einer Klemme fixiert. Abbildung 2-4c zeigt die entstandene Perforation des Prüfkörpers durch die Verwendung des Nahtkamms. Danach wurde der Aufbau in der Universalprüfmaschine eingespannt. Für jede Prüfung wurden Prüfkörper für verschiedene Richtungen des Materials getestet. Der mit 500 N belastete Probekörper wird eingeschnürt.

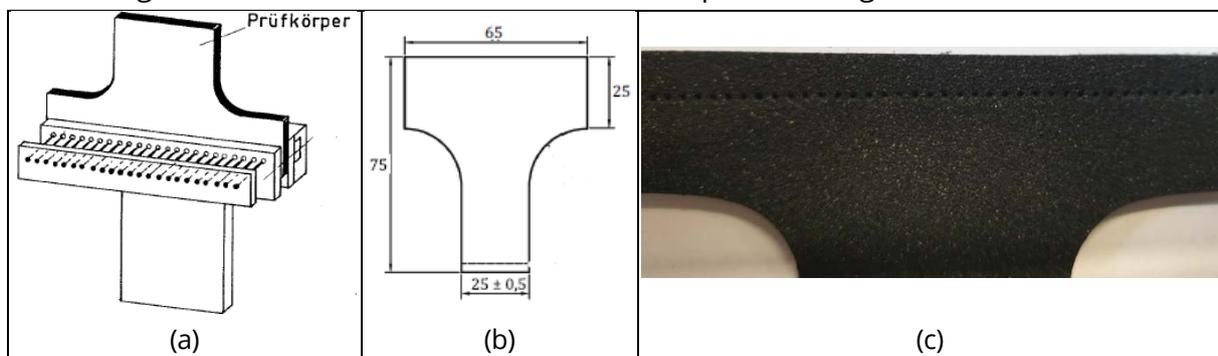


Abbildung 2-4: links: Kamm zur Prüfung der Nahtfestigkeit und rechts: Prüfkörper nach DIN 17697 (Dimensionen in mm) b) Perforierter Prüfkörper M1 Kunstleder

In Abbildung 2-5 ist das Kraft-Weg-Diagramm in a- und b-Richtung für Kunstleder dargestellt. Bei 500 N Belastung wird in a-Richtung eine Verformung von ca. 16 mm erreicht. In b-Richtung wird das Material ca. 37 mm verformt.

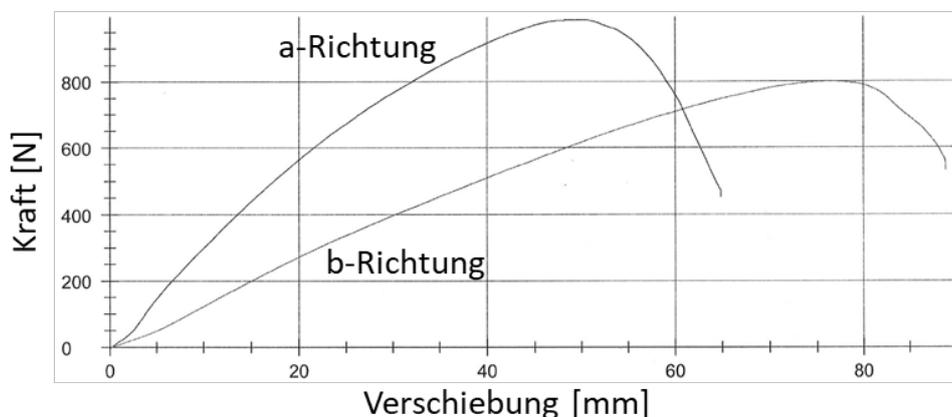


Abbildung 2-5: Kraft-Weg-Diagramm Zugversuch mit Nahtkamm; Kunstleder

### 2.3 Ermittlung der Biegefestigkeit von durchtrittssicheren Einlagen

Bei der Norm-Prüfung der Biegefestigkeit nach DIN EN 12568 [8] werden Rissbildungen, Zerfall und Delaminierung durch das zyklische Biegen der Einlage untersucht (Abbildung 2-6). Hierdurch wird der Gehvorgang in einer Normprüfung vereinfacht experimentell nachgestellt. Bei der Prüfung wird die Einlage mit einer Frequenz von  $16 \pm 1$  Hz genau  $10^6$  Biegezyklen unterworfen. Danach wird eine visuelle Prüfung der Einlage vorgenommen.

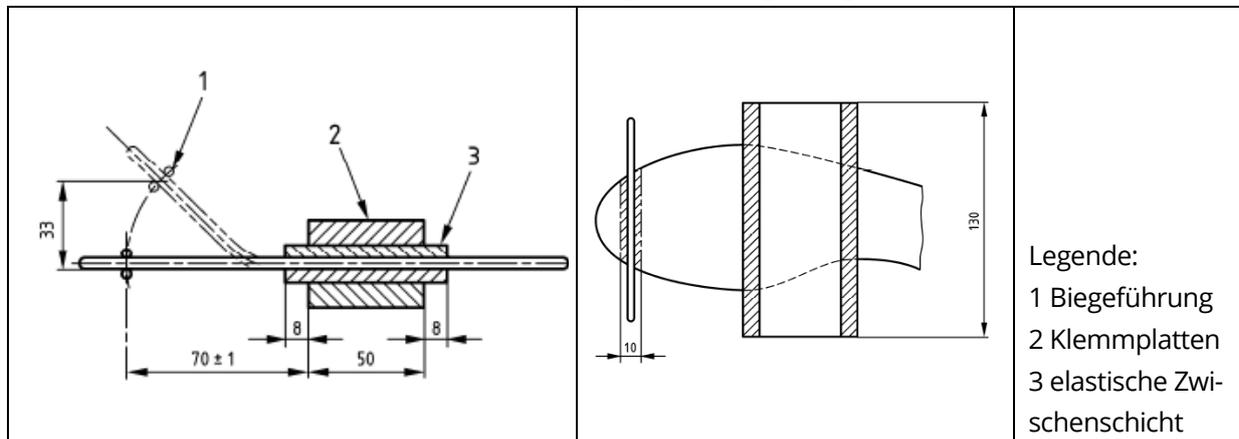


Abbildung 2-6: Prüfaufbau zur Bestimmung der Biegefestigkeit von durchtrittssicheren Einlagen nach DIN EN 12568

Bei der Prüfung der Biegefestigkeit wird die Flexibilität der durchtrittssicheren Einlage über den vorgegebenen Benutzungszeitraum untersucht, ohne dass die Einlage durchbricht oder einreißt. Für die Versuche wurden durchtrittssichere Einlagen aus Metall verwendet. Die Dicke der verwendeten Einlagen variierte zwischen 0,5 mm und 1 mm. Die verwendeten Einlagen wurden gemäß DIN EN 12568 in der Länge gekürzt und eine entsprechende Biegelinie wurde eingezeichnet. Nach der Vorbereitung der Einlagen wurden diese in einer Biegeprüfmaschine eingespannt und geprüft (Abbildung 2-7).

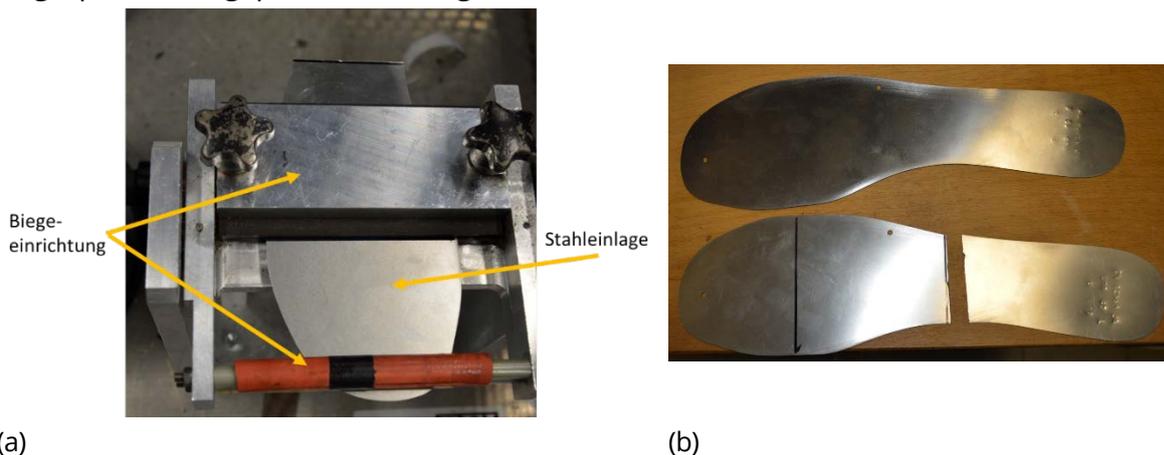


Abbildung 2-7: a) Eingespannte Einlage in der Biegeprüfmaschine, b) untersuchte durchtrittssichere Einlagen

Bei der Normprüfung der Einlagen werden diese nach 1.000.000 Zyklen auf Beschädigungen untersucht. Um Vergleiche mit den Simulationsergebnissen durchführen zu können, wurden die Stahlsohlen alle 100.000 Zyklen auf Beschädigungen untersucht. Durch dieses Vorgehen

konnte eine detailliertere Aussage über das Verschleißverhalten der Sohle getroffen werden. Zusätzlich zur optischen Prüfung wurde eine Bestimmung des Biegeverhaltens in Anlehnung nach DIN EN ISO 20344 durchgeführt (siehe Abbildung 2-8). Der Prüfling wurde so auf die Biegeplatte aufgesetzt, dass die Biegelinie des Prüflings auf der Biegelinie des Geräts liegt. Mithilfe der Halteplatte wurde der Prüfling am Prüfgerät fixiert. Danach wurde das Belastungsgewicht (500 g) auf die Biegeplatte aufgebracht. Der daraus resultierende Biegewinkel in Grad wurde an der Skala abgelesen.

Bei der Standardprüfung zum Biegeverhalten nach DIN EN ISO 20344 wird ein Schuh in die Biegevorrichtung eingespannt und mit 30 N belastet. Da die Stahlsohle aber einen geringeren mechanischen Widerstand im Vergleich zu einem Schuh bietet, wurde das Belastungsgewicht auf 500 g reduziert. Das Belastungsgewicht wurde durch Vorversuche bestimmt. In Tabelle 2-1 wurden die Ergebnisse von zwei Messreihen zusammengetragen.

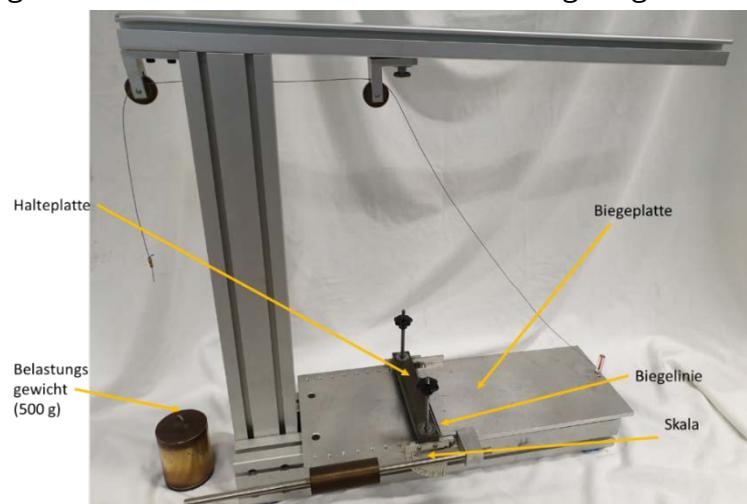


Abbildung 2-8. Vorrichtung zur Bestimmung des Biegeverhaltens nach DIN EN ISO 20344

Tabelle 2-1. Ergebnisse der Prüfung durchtrittsicherer Einlagen aus Metall unter 500 g Belastungsgewicht

Zyklenzahl	Biegewinkel Probe 1 [°]	Biegewinkel Probe 2 [°]
100.000	10,0	7,5
200.000	9,0	9,0
300.000	10,0	12,0
400.000	10,0	12,0
500.000	10,0	10,0
600.000	7,5	9,0
700.000	10,5	11,0
800.000	12,0	12,0
900.000	11,5	11,5
1.000.000	11,5	11,5

Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass der Biegewinkel mit der Anzahl der Biegezyklen leicht steigt und auch zwischen den Messungen variiert. Auch bei der optischen Überprüfung der durchtrittsichereren Einlagen konnten während der Versuche keine Risse oder Bruchstellen

festgestellt werden. Auch eine Deformation der Sohlen nach den Versuchen konnte nicht beobachtet werden.

## 2.4 Prüfung der Durchtrittsicherheit

Bei der Normprüfung von Einlagen nach DIN EN 20344 [6] wird ein definierter Prüfdorn mit einer festgelegten Geschwindigkeit von 10 mm/min in die Einlage gedrückt. Beim Erreichen der Prüfkraft von 1100 N darf die Einlage nicht durchstochen werden [8]. Zur experimentellen Untersuchung wurden Durchtrittsprüfungen nach DIN EN 12568 durchgeführt. Zur erweiterten Messwerterfassung wurden Kraft-Weg-Diagramme, sowie die Druckverteilung mithilfe von Druckmessfolien aufgezeichnet. Um hauptsächlich die elektronische Druckmessfolie vor Beschädigungen durch einen Durchstich zu schützen, wurde vorab ein Versuch ohne Druckmessfolie bis zum Durchstich durchgeführt und das Kraft-Weg-Diagramm aufgezeichnet (siehe Abbildung 2-9). Dieses zeigt einen Kraftanstieg innerhalb eines Weges von ca. 2,4 mm bis auf ca. 1450 N. Bei dieser Kraft wurde die Einlage durchstochen, was an dem Kraftabfall erkennbar ist. Bei den weiterführenden Prüfungen wurde jeweils die elektronische Druckmessfolie bzw. Prescale Druckmessfolie zwischen Prüfling und oberer Halteplatte befestigt (siehe Abbildung 2-10).

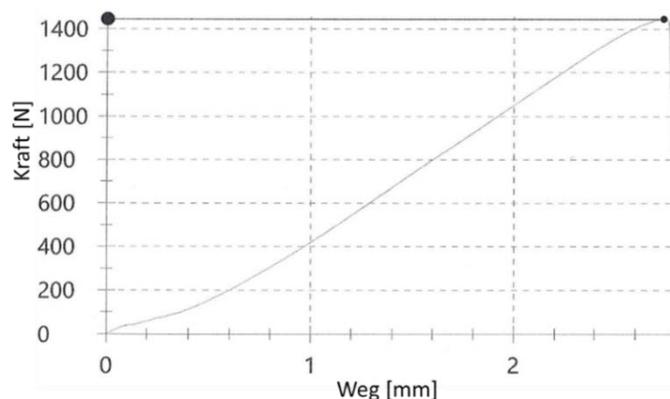


Abbildung 2-9: Kraft Weg-Diagramm einer durchtrittsicheren Einlage aus Metall

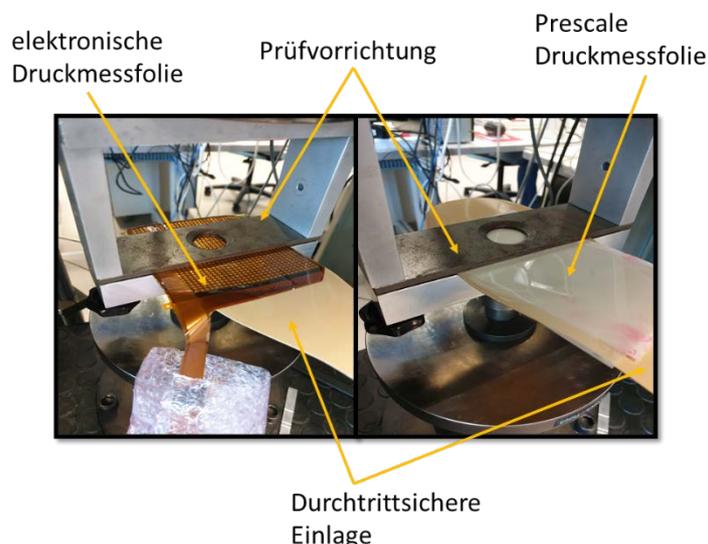


Abbildung 2-10: Prüfaufbau: links: elektronische Druckmessfolie; rechts: Prescale Druckmessfolie

Um die Druckverteilung während des Versuchs aufzuzeichnen, wurden zuerst die Versuche mit der elektronischen Druckmessfolie durchgeführt. Die Prüfkraft wurde solange erhöht bis entweder die Druckgrenze von 10 bar bei der elektronischen Druckmessfolie oder 70 % der Prüfkraft aus dem Vorversuch erreicht wurde. Dadurch wurde eine Zerstörung der Folie durch Überlast oder Durchstich verhindert. Abbildung 2-11 zeigt den aufgezeichneten Druckverlauf bei einer Prüfkraft von 400 N. Hier wurde entsprechend der maximale Prüfdruck der Druckmessfolie erreicht. Der Druckverlauf zeigt eine sich ringförmig ausbreitende Belastung der Sohle, die nur in den Randbereichen der Halteplatte auftritt. Diese erreicht bei einer Kraft von 400 N auf den Prüfnagel maximale Drücke im Randbereich von ca. 10 bar.

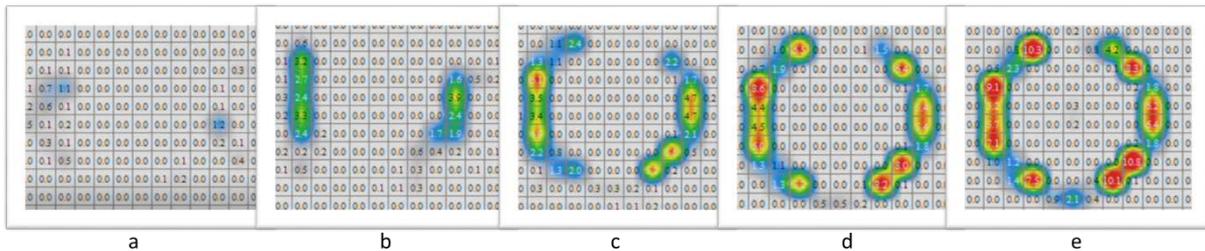


Abbildung 2-11: Druckverlauf: a: 0 N; b: 100 N; c: 200 N; d: 300N; e: 400 N, gemessen mit elektronischer Druckmessfolie

Um die Druckverteilung auch bei höheren Drücken zu bestimmen, wurden bei den folgenden Versuchen die Prescale Druckmessfolien Super Low Pressure (5 bar – 25 bar) verwendet. Die Folie ist eine Einweg-Druckmessfolie, die nach jedem Versuch ersetzt wurde. Die aufgezeichnete Druckbelastung bei 500 N und 1100 N (siehe Abbildung 2-12) zeigt ebenfalls eine ringförmige Druckverteilung am dem Außenring der Halteplatte. Bei einer Kraft von 1100N zeichnet sich in der Mitte der Prüfaussparung die Nagelspitze des Prüfdorns ab.

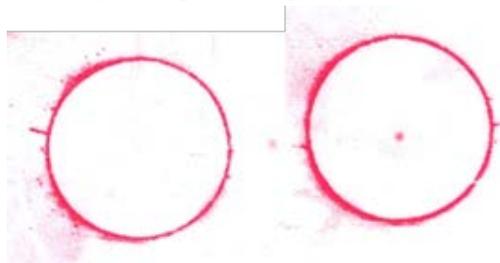


Abbildung 2-12: links: Druckverteilung bei 500 N; rechts: Druckverteilung bei 1100 N, gemessen mit Prescale Druckmessfolien

### 3 Modellierung und Simulation

#### 3.1 Energieaufnahme im Fersenbereich

CAD-Modelle des Stempels und der Sohle wurden durch Scannen erstellt und in FEM-Modelle überführt. Dazu wurde eine Vernetzung mit Solid-Elementen (Volumenelemente) vorgenommen (siehe Abbildung 3-1a). Das Modell des Prüfstempels wurde zunächst mit einer Platte kombiniert, auf die der Stempel drückte.

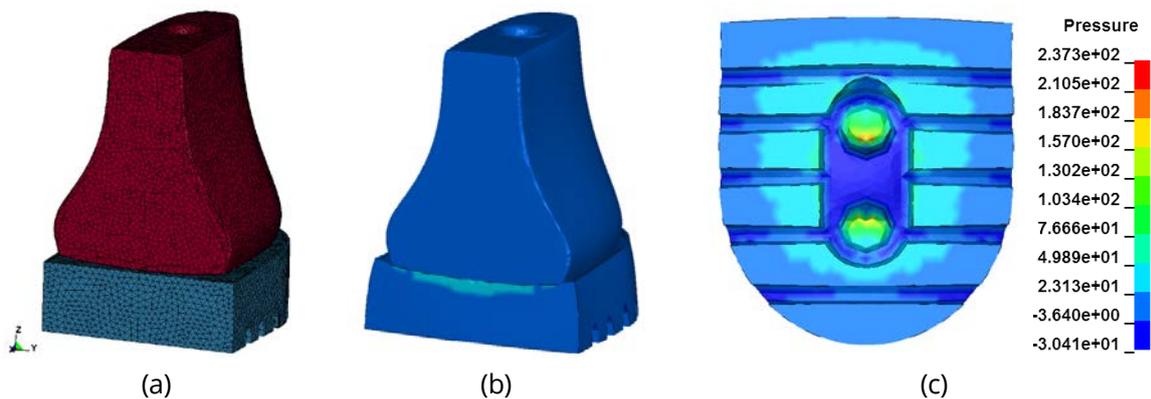


Abbildung 3-1: Simulation der Energieaufnahme im Fersenbereich einer fiktiven Sohle in LS-DYNA: a) FEM-Modell inkl. Prüfstempel, b) Simulation, c) Druckverteilung in der Sohle

Eine Simulation eines Zugversuchs wurde verwendet, um die Materialparameter einzustellen. Die Modelle wurden im FEM Programm LS-DYNA erstellt. Es wurde das Materialmodell von Mooney-Rivlin für Kautschuk verwendet (Keyword: MAT\_MOONEY-RIVLIN\_RUBBER, MAT\_027). Als Ergebnis konnten die Materialmodelle für das Sohlenmaterial validiert und für Drucksimulationen weiterverwendet werden (Abbildung 3-2).

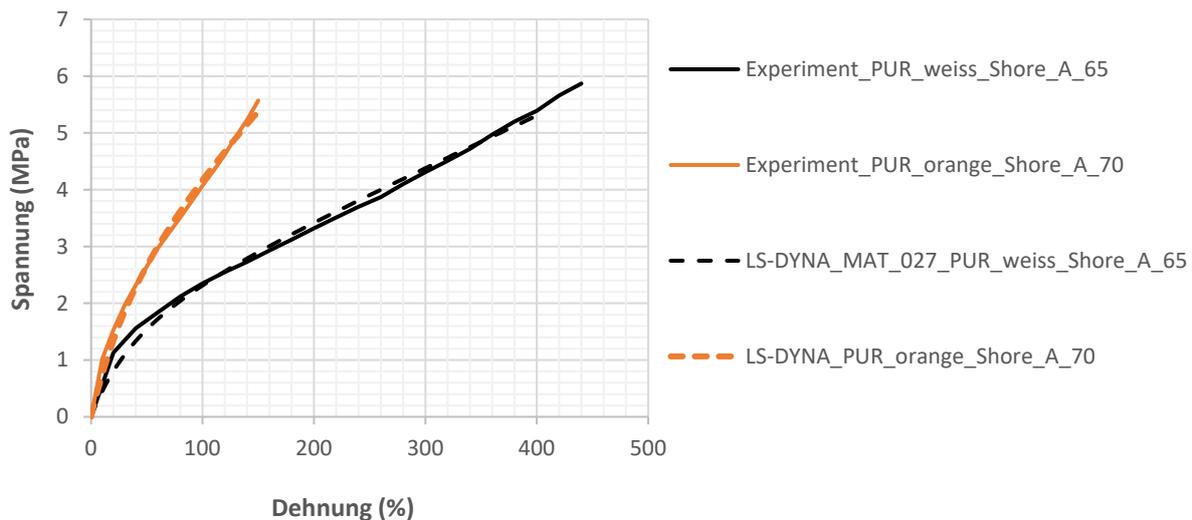


Abbildung 3-2: Ergebnisse der Simulation des Zugversuchs des Sohlenmaterials mit MAT\_MOONEY-RIVLIN\_RUBBER in LS-DYNA

In LS-DYNA wurden Druckversuchssimulationen mit dem Stempel und Sohlenabsatz durchgeführt und durch Vergleich mit den experimentellen Daten ausgewertet. In dem Modell des Druckversuchs wurde der Druckstempel als starr modelliert und nur in der vertikalen Richtung mit konstanter Geschwindigkeit bewegt. Aus der Simulation können außer der Druckverteilung auf der Sohle auch die Kraft-Verschiebungs-Kurve zwischen Experiment und Simulation zur Modellvalidierung verglichen werden.

Die Kraft-Verschiebungs-Kurven können sowohl aus Versuchs- als auch aus Simulationsdaten betrachtet werden. Daraus kann die Energieaufnahme mit der folgenden Formel in Anlehnung von DIN EN 20344 berechnet werden:

$$\int_{50(N)}^{5000(N)} F ds \quad (1)$$

Hierin sind  $F(N)$  die Druckkraft und  $s(mm)$  die Verschiebung des Stempels.

Um die Sensitivität der Modelle zu analysieren, wurden die Ausgangsparameter von PUR Weiß Shore A 65 fiktiv variiert. Die Spannung in der Spannungs-Dehnungs-Kurve wurde mit einem Faktor zwischen 0,5 und 2,0 variiert. Mit den fiktiven Parametern wurden Simulationen des Druckstempels auf der Platte durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass je weicher das Material ist, desto größer ist die Verschiebung des Stempels, um 5000 N Druckkraft zu erreichen (Abbildung 3-3). Das bedeutet auch, dass je weicher das Material ist, desto mehr Energie kann die Platte aufnehmen. Die Verteilung des Drucks auf die Platte mit weicherem Material ist auch breiter und die Druckwerte sind dabei niedriger im Vergleich zu den Platten mit härterem Material (Abbildung 3-4). Die gezeigten Ergebnisse beweisen, dass die Modelle in der Lage sind, die Auswirkungen der mechanischen Eigenschaften des Materials auf die Energieaufnahme beschreiben zu können.

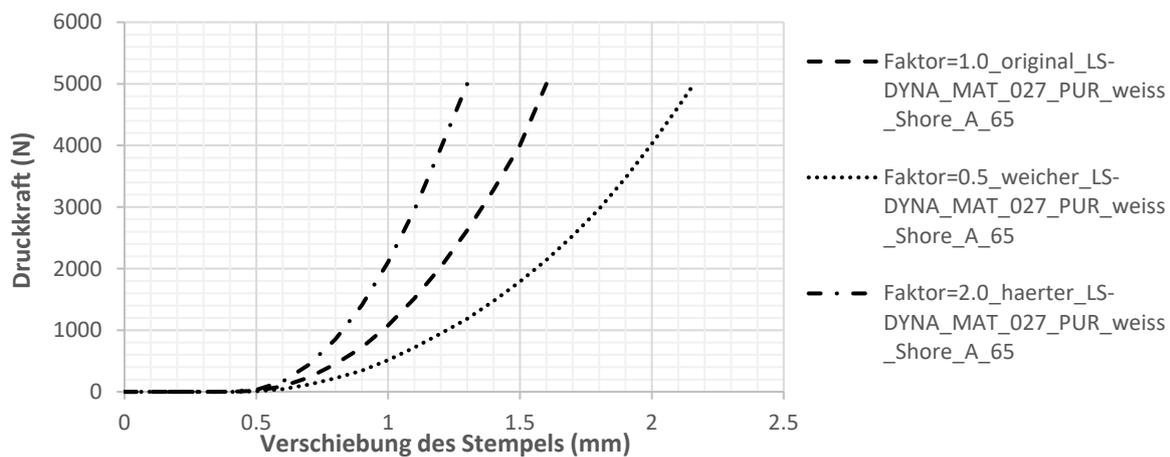


Abbildung 3-3: Druckkraft-Verschiebungs-Kurven mit geänderten Parametern der mechanischen Eigenschaften der Platte

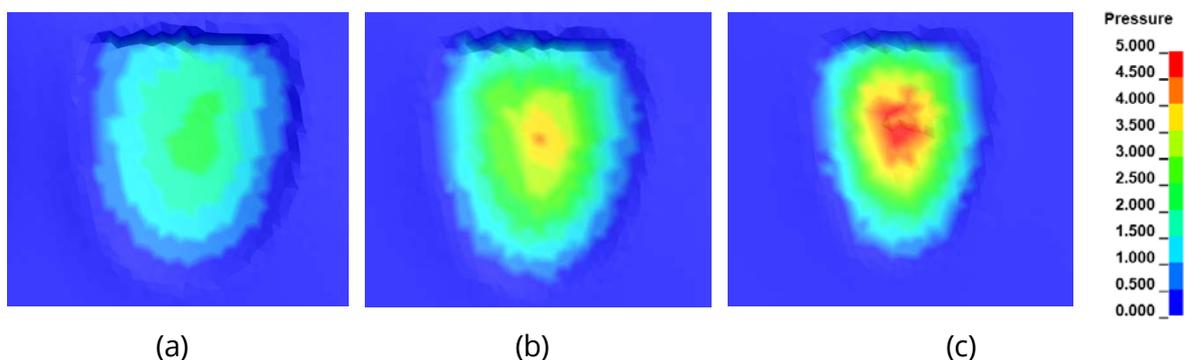


Abbildung 3-4: Simulierte Druckverteilungen (Einheit  $N/mm^2$ ) auf der Platte aus PUR weiß Shore A 65 bei Druckkraft = 5000 N (in LS-DYNA): (a) Faktor=0,5 (weicher) (b) Faktor=1,0 (original) (c) Faktor=2,0 (härter)

Der Versuch wurde weiterhin mit kompletten Sohlen simuliert. Ergebnisse der Simulation mittels LS-Dyna sind in Abbildung 3-5 dargestellt. Mittels Analyse der Verschiebung in z-Richtung (Dickenrichtung) kann das Eindringen des Sohlenmaterials bei einer bestimmten Kraft

analysiert werden. Daraus kann der Aufbau der Sohle angepasst werden. Zudem kann die Druckverteilung in der Sohle ausgewertet werden und für das Sohlendesign verwendet werden.

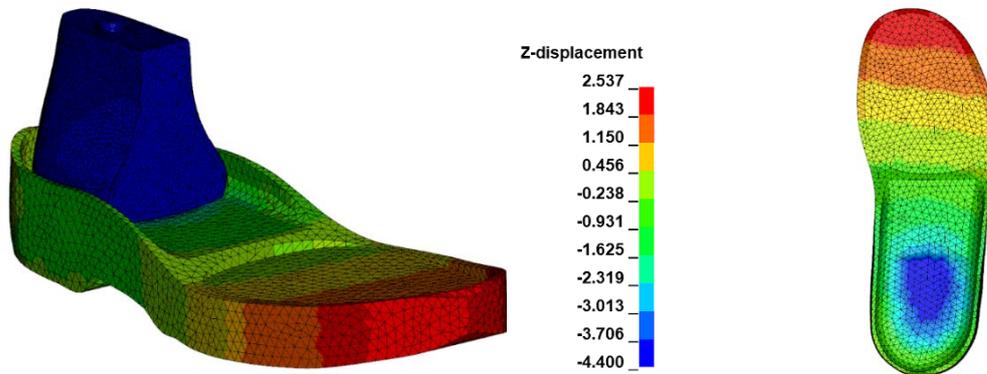


Abbildung 3-5: Simulation der Energieaufnahme im Fersenbereich einer echten Sohle in LS-DYNA, Verschiebung in z-Richtung in mm

Der Druckversuch wurde für eine weitere Sohle mit dem Prüfstempel simuliert (Abbildung 3-6). Der Prüfstempel wurde im Modell dazu im Fersenbereich angesetzt. Die Ergebnisse für die Druckverteilung in der Sohle im Fersenbereich zeigen erhöhte Werte im Randbereich, wie sie auch in den Experimenten ermittelt wurden.

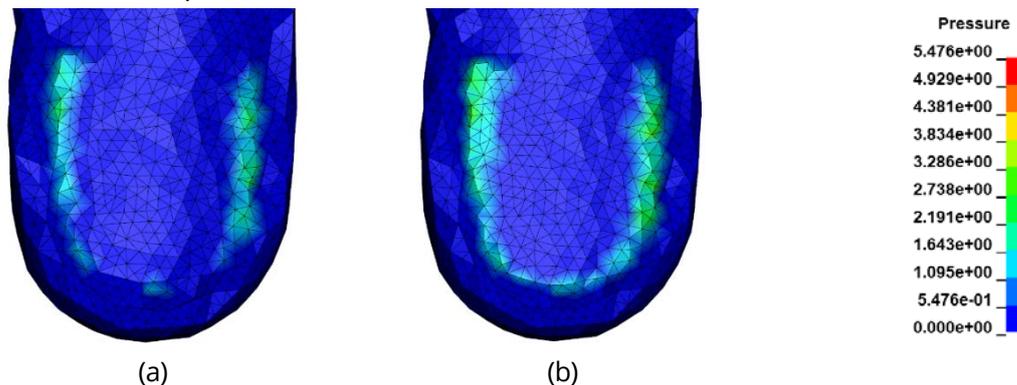


Abbildung 3-6: Druckverteilung im Fersenbereich einer realen Sohle bei (a) 2500 N und (b) 5000 N Druckkraft

### 3.2 Nahtfestigkeit

Bei der Nahtfestigkeitsprüfung wird die Verbindung zwischen zwei Probekörpern mittels Nadeln simuliert. Dementsprechend werden die Nadeln, die rechte und die linke Nadelaufnahme, sowie die entsprechenden Probekörper modelliert und in FEM-Modelle umgewandelt (Abbildung 3-7). Zunächst wurden Simulationen der Zugversuche nach DIN EN ISO 1421-1 zur Validierung der Materialmodelle durchgeführt und so die Materialmodelle validiert. Es wurde ein benutzerdefiniertes Materialmodell für Textilien nach Döbrich et al. [10]. Damit wurde das Material getrennt in die verschiedenen Richtungen beschrieben. Als Versagensmodell wurde die maximale Dehnung der Schalenelemente begrenzt. Kennwerte wurden Zugversuchen entnommen. Die Materialmodelle wurden durch Vergleich zwischen den ex-

perimentell ermittelten Kurven und des mittels Simulation bestimmten Materialverhalten validiert und konnten somit für weitere Simulationen verwendet werden.

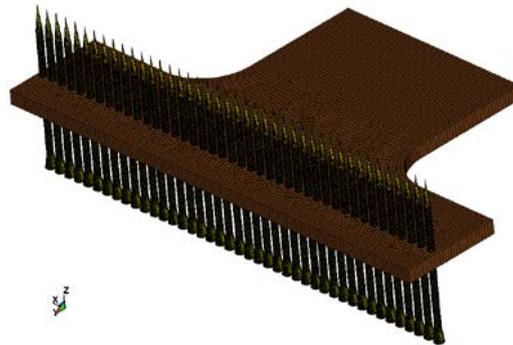


Abbildung 3-7: a) Berechnungsmodell für die Nahtfestigkeitsprüfung

Die Materialgesetze wurden in das Modell zur Simulation der Nahtfestigkeit übernommen. Nadeln und T-Proben wurden mit Schalenelementen modelliert. Die Nadeln sind als starr angenommen und in alle Richtungen sowohl in Translationen als auch Rotationen fixiert. Der untere Rand der T-Probe wurde in x- und z-Richtung fixiert sowie mit konstanter Geschwindigkeit in y-Richtung gezogen. Als Kontaktformulierung zwischen Nadeln und Probekörper wurde ein Oberflächenkontakt in LS-DYNA gewählt (Keyword CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE). Damit wurden dann Simulationen der Versuche der Nahtfestigkeitsprüfungen durchgeführt. Berechnete Kraft-Verschiebungs-Kurven sind in Abbildung 3-8 für beide Materialrichtungen für zwei Materialien (Kunstleder, Goretex) gezeigt. Es wurde jeweils eine sehr gute Übereinstimmung der experimentell ermittelten und simulierten Kurven festgestellt und die Modelle damit validiert. Die Ergebnisse für die simulierten Spannungen im Probekörper sind für beiden Materialien beispielhaft in Abbildung 3-9 gezeigt. In den Ergebnissen ist das Auseinandergehen des Materials an den Kontaktstellen zu den Nadeln zu erkennen. Je nach Materialfestigkeit geschieht dies bei verschiedenen Spannungen.

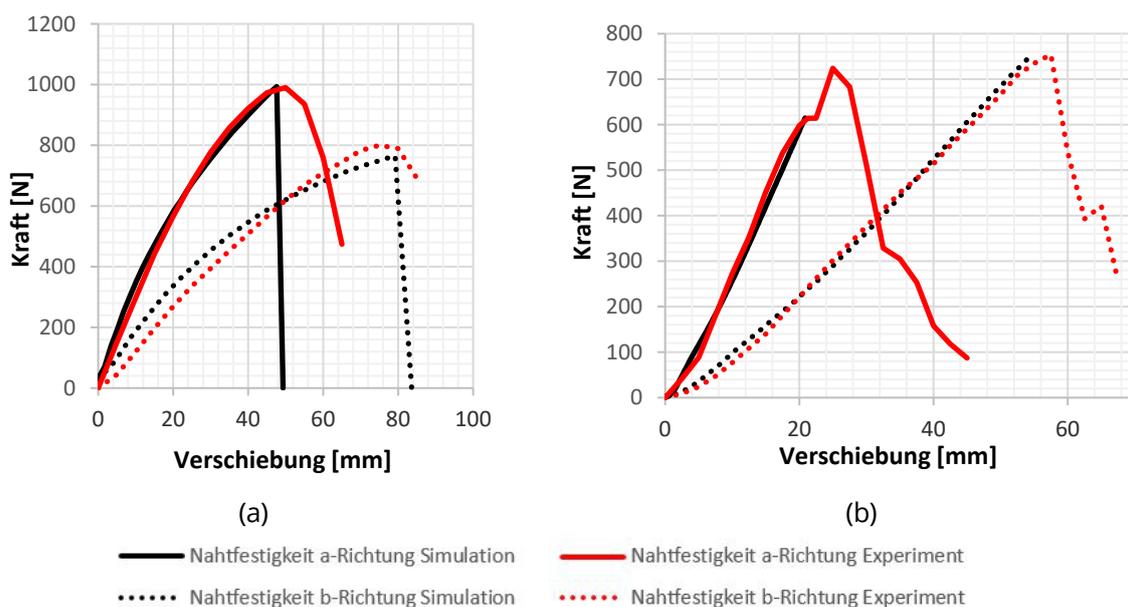


Abbildung 3-8: Kraft-Verschiebungs-Kurven aus Experimenten und Simulationen der Nahtfestigkeit für a) Kunstleder und b) Goretex

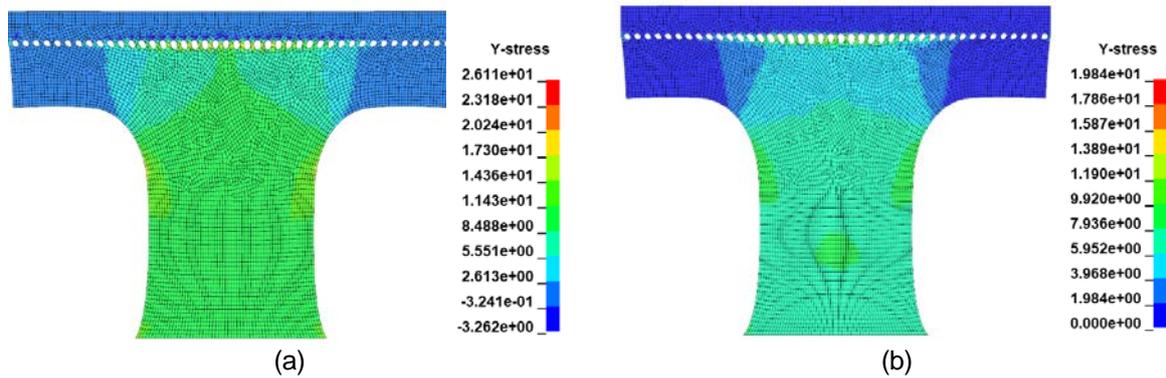


Abbildung 3-9: Spannung der Probe während der Simulation der Nahtfestigkeit in a-Richtung für a) Kunstleder und b) Goretex

### 3.3 Biegefestigkeit von durchtrittsicheren Einlagen

Es wurde ein FEM-Modell des Biegeversuchs der Einlagen aufgebaut. Der Versuchsaufbau wurde nach DIN 12568 modelliert (Abbildung 2-6 und Abbildung 3-10). Der Druck auf die Klemmplatten wurde mit 1000 N im Modell eingesetzt. Die elastische Zwischenschicht wurde als Polyvinylchlorid (PVC) angenommen. Die Klemmplatten wurden mit einem starren Material modelliert. Die Dicke der Einlagen wurde wie folgt variiert: 0,5 mm, 1 mm, 2 mm. Ein elastisch-plastisches Materialmodell wurde mit den Parametern von DC04 Stahl benutzt:

- Dichte:  $7,85 \times 10^{-9} \text{ g/mm}^3$
- Elastizitätsmodul:  $210.000 \text{ N/mm}^2$
- Querkontraktion: 0,3
- Spannungs-Dehnungs-Kurve nach Abbildung 3-11a
- Bruchdehnung (effektive plastische Dehnung): 0.12

Die Simulation für einen Prüfungszyklus wurde durchgeführt. Die Kräfte zum Biegen der Einlage wurden aufgenommen (Abbildung 3-11b). Weitere Ergebnisse zeigen die Spannungsamplitude (Abbildung 3-12) sowie die effektive plastische Dehnung (Abbildung 3-13) während der Prüfung. Mittels Implementierung der Wöhlerkurve für Stahl wurde mittels der Software LS-DYNA die Lebensdauer nach der Hypothese der linearen Schadensakkumulation nach Palmgren-Miner berechnet (Abbildung 3-14). Das Modell der Einlegesohle kann weiter für die Simulation in einem Schuh verwendet werden.

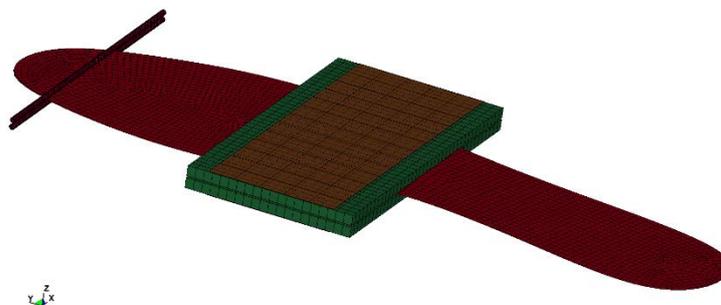


Abbildung 3-10: FEM Modell des Versuchsaufbaus

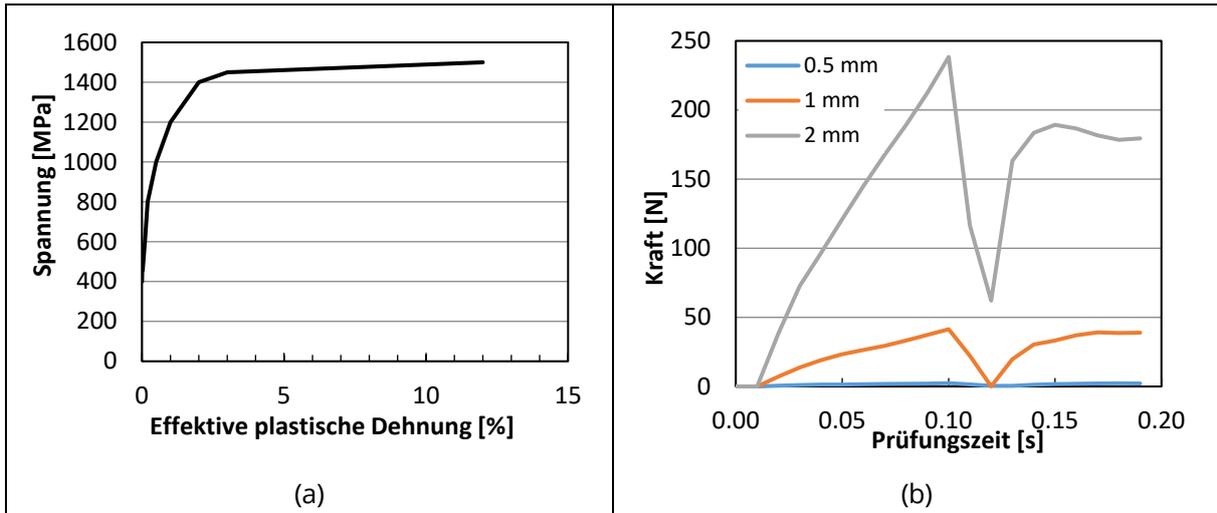


Abbildung 3-11: a) Spannungs-Dehnungs-Kurve von DC04, b) Gemessene Kräfte zum Biegen der Einlage bei verschiedener Dicke der Einlagen

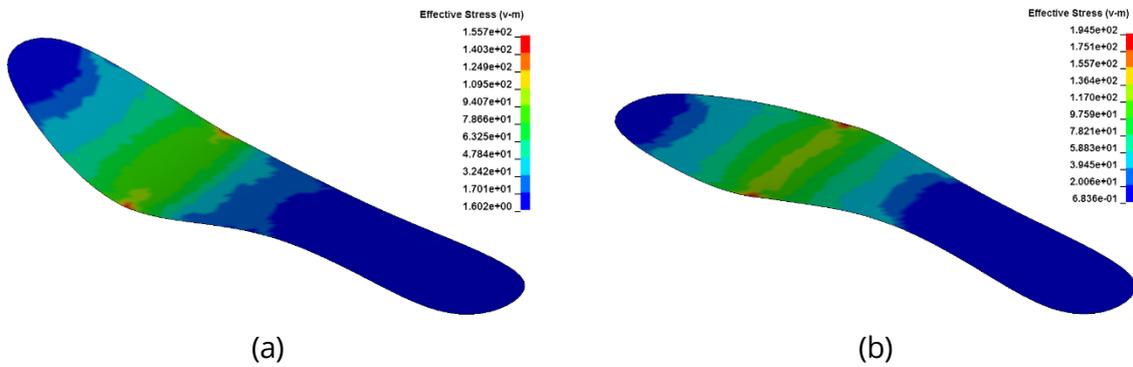


Abbildung 3-12: Spannungsamplitude während der Prüfung (0,5 mm dicke Probe): (a) im Mittel des Zyklus und (b) am Ende des Zyklus

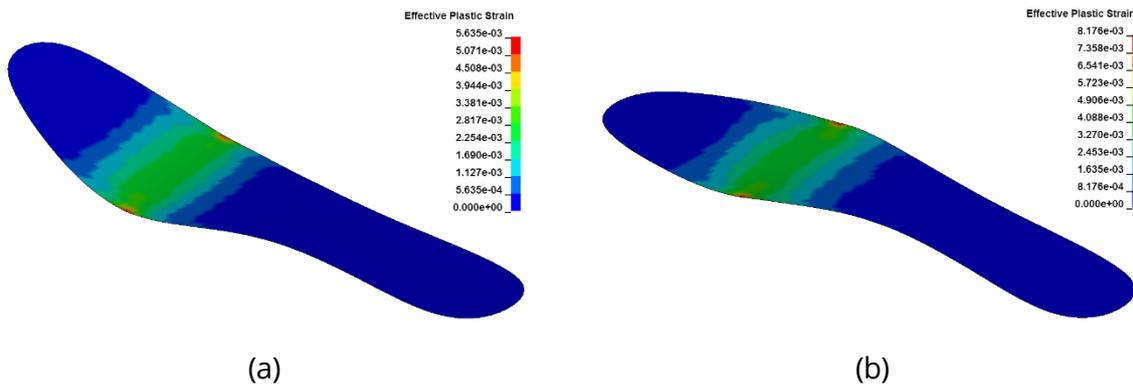


Abbildung 3-13: Die effektive plastische Dehnung während der Prüfung (0,5 mm dicke Probe): (a) im Mittel des Zyklus und (b) am Ende des Zyklus

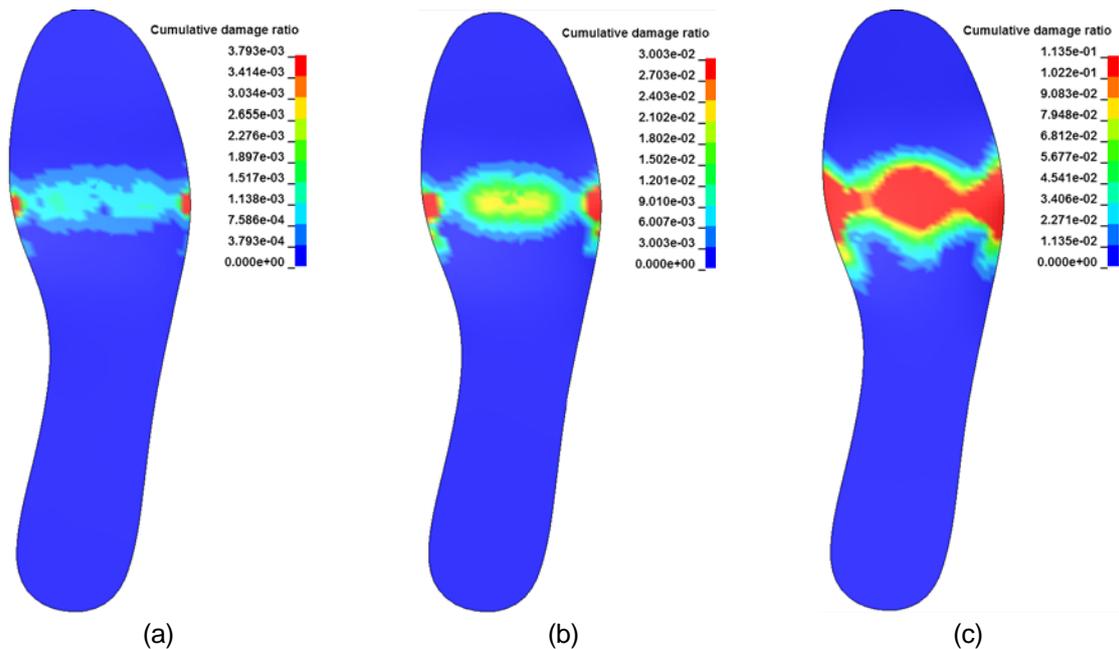


Abbildung 3-14: Schadensakkumulation nach Palmgren-Miner für einen Zyklus: a) Probe mit 0,5 mm Dicke, b) 1 mm Dicke und c) 2 mm Dicke

### 3.4 Durchtrittssicherheit (DIN EN 20344)

Bei der Modellerstellung für die Simulation der durchtrittssicheren Einlagen wurden der Prüfnagel sowie die entsprechende Gegenhalterplatte modelliert. Die verwendeten durchtrittssicheren Einlagen wurden aus dem Modell für die Biegefestigkeit übernommen. Dazu wurde auch ein Zusammenbau der Prüfungsanordnung erstellt. Aus den CAD-Daten wurde ein FEM-Modell zur Simulation der Durchtrittssicherheit erstellt (Abbildung 3-15). Das Materialmodell und die Parameter entsprechen dem Modell für die Biegefestigkeit. Der Prüfstift wurde als starres Material modelliert.

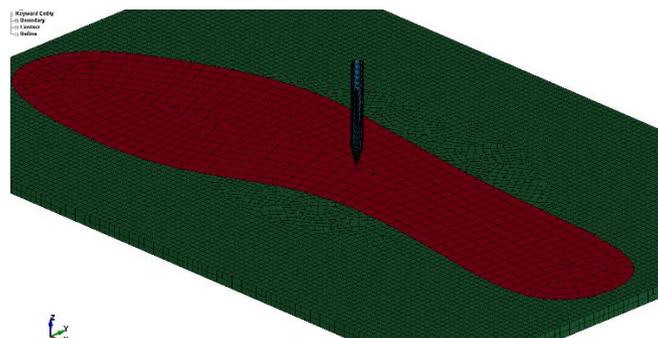


Abbildung 3-15: Modell des Versuchsaufbaus zur Bestimmung der Durchtrittssicherheit von Einlegesohlen

Die Simulationsergebnisse zeigen den Druck und die Deformation der Prüfstücke (Abbildung 3-16). Die Durchstechkraft wurde aufgenommen (Abbildung 3-17a) und die Spannungsverteilung ermittelt (Abbildung 3-17b). Die realen Versuchsergebnisse zeigen im Vergleich zu den simulierten Versuchen gerade im Bereich der Druckverteilung ähnliche Ergebnisse. Vor allem im Randbereich des Außenrings der Halteplatte sowie in der Mitte am Prüfnagel tritt die größte Druckbeanspruchung auf (siehe Abbildung 2-11, Abbildung 2-12 und Abbildung

3-17b). Bei der Aufnahme des Kraft-Weg-Diagramms (siehe Abbildung 2-9) wurde ein Durchtritt des Nagels bei einem Weg von ca. 2,8 mm und einer Kraft von ca. 1450 N aufgezeichnet. Bei der Simulation (siehe Abbildung 3-17a; 1 mm Graph) wurde die Einlage nach einem Weg von ca. 2,7 mm bei einer Kraft von ca. 1250 N durchstoßen. Die geringen Abweichungen hängen womöglich mit anisotropen Materialeigenschaften der Einlagen oder geringfügigen Schichtdickenunterschieden zusammen. Das Modell ist somit validiert und kann zur weiteren Simulation eines Schuhs verwendet werden.

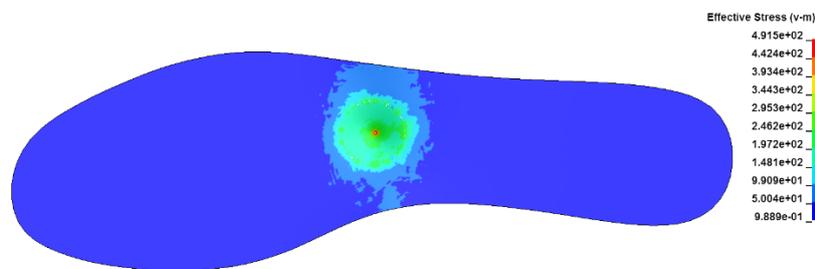
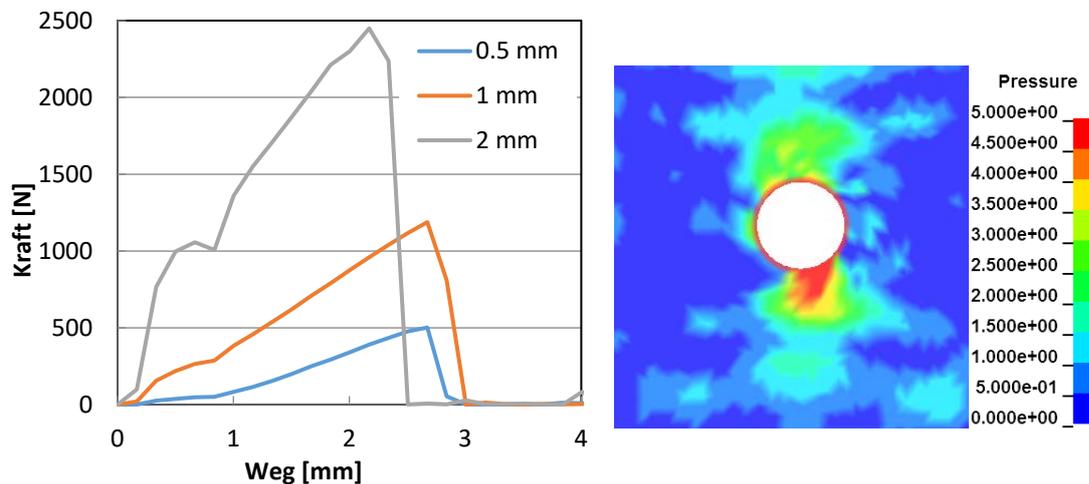


Abbildung 3-16: Spannung im Prüfkörper kurz vor dem Versagen, Probe mit 0,5 mm Dicke



(a)

(b)

Abbildung 3-17: a) Simulierte Kraft-Weg-Kurven des Prüfstifts, b) Simulierte Druckverteilung auf den Prüfkörper

#### 4 Demonstration der FEM-Entwicklungskette an Schuhen

Zur Simulation des Versuchsaufbaus wurde ein CAD-Modell eines vereinfachten Schuhs erstellt. Auf Basis der CAD-Daten des Versuchsaufbaus zur Simulation einer Gehbewegung und seines Arbeitsprinzips (Abbildung 4-1a und b) wurde das FEM-Modell in LS-DYNA erstellt (Abbildung 4-1c). Das Oberteil wurde mit Schalenelementen modelliert und mit Materialparametern von Kunstleder versehen, während die Sohle mit Solid-Elementen vernetzt und mit Materialparametern von PUR orange Shore A 70 versehen wurde. Zur Vereinfachung wurden nur die wesentlichen Bauteile des Prüfstands modelliert. Die Parameter des Nahtmodells entsprechen denen für Kunstleder. Die Abbildung weiterer Materialien ist durch Implementierung der entsprechenden experimentell bestimmten Materialgesetze problemlos möglich.

Die Belastung wurde direkt auf dem Werkzeug mit dem Keyword LOAD\_SEGMENT angewendet. Laut des Arbeitsprinzips sollte der Schuhe mit einer Prüffrequenz von  $60 \text{ min}^{-1}$  geprüft werden. Im Modell wurden zunächst nur drei Zyklen abgebildet. Die Ergebnisse für die Schuhsohle zeigen, wie stark die Schuhsohle von den Werkzeugen gedrückt wird (Abbildung 4-2a) bzw. zeigen die Spannung im Obermaterial (Abbildung 4-2b).

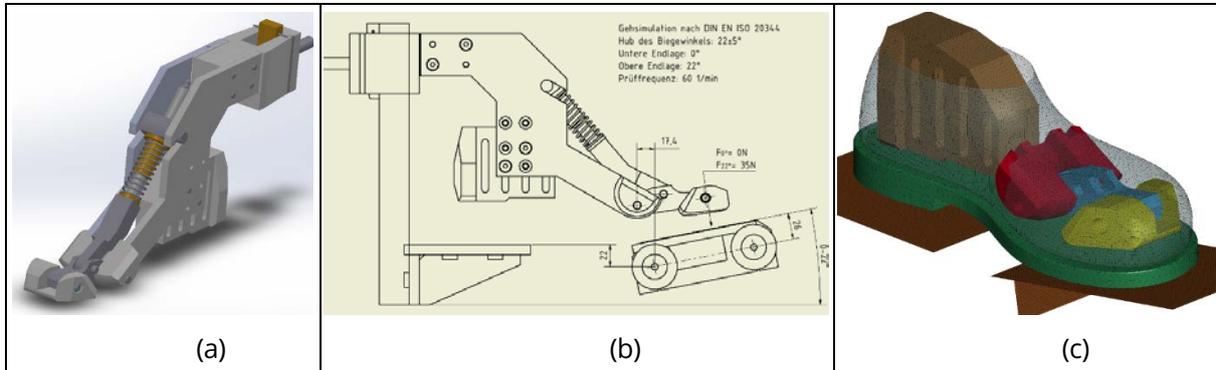


Abbildung 4-1: a) CAD-Modell des Prüfaufbaus für Gehbewegung, b) Arbeitsprinzip und (c) FEM-Modell für Gehprüfungssimulation mit vereinfachtem Schuh

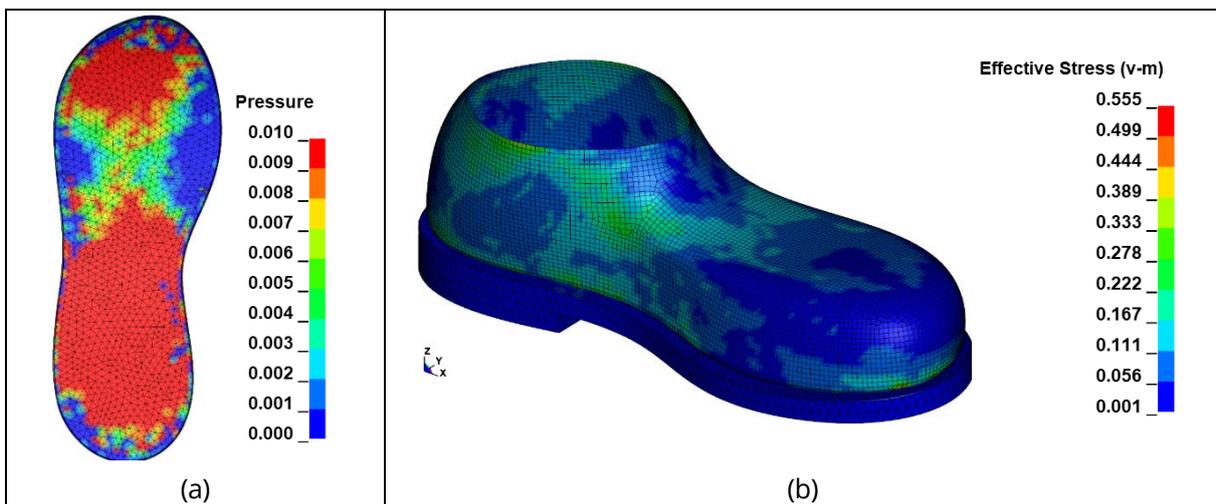


Abbildung 4-2: a) Simulierte Druck auf der Schuhsohle (bei  $t=0.1\text{s}$ , Einheit  $\text{N/mm}^2$ ) und b) Spannung im Oberteil (Kunstleder) während der Gehprüfung  $t=0.1\text{s}$  (Einheit  $\text{N/mm}^2$ )

Eine durchtrittsichere Einlage aus Stahl wurde ebenfalls in das LS-Dyna Modell hinzugefügt (Abbildung 4-3). Dabei wurden die Einlage und die Sohle durch das Keyword \*CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID verbunden. Das ist eine kinetische Kopplung zwischen den Teilen. Die Simulation des Schuhs mit Einlegesohle zeigt die Biegung der Einlegesohle (Abbildung 4-3). Weitere Kennwerte der Einlegesohle wie Spannung, plastische Dehnung und Schadensakkumulation nach Palmgren-Miner können auch beobachtet und ausgewertet werden (Abbildung 4-4). Die Einlegesohle im gezeigten Modell war 1 mm dick, damit die Kraft von 1100 N während der Prüfung der Durchtrittsicherheit erreicht werden kann. In diesem fiktiven Modell ist die Biegung nicht sehr kritisch, weswegen die Einlegesohle nicht beschädigt wird. Dieses Modell kann somit zur Beurteilung des Ermüdungsversagens der Sohle beim Biegen im Modell des Gesamtschuhs, also unter realistischen Bedingungen, herangezogen werden.

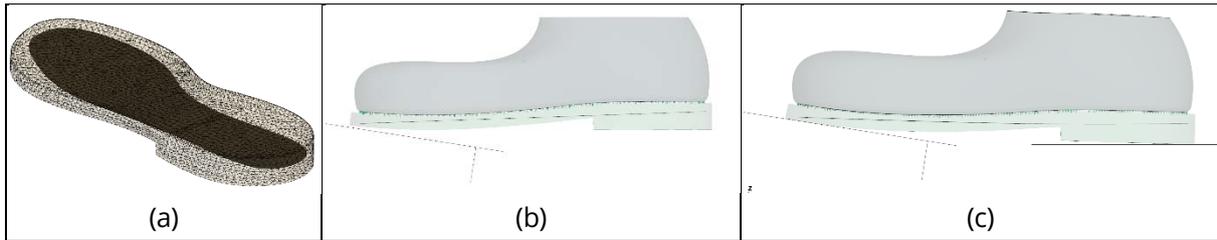


Abbildung 4-3: Schuhmodell inklusive Einlegesohle: a) Modell einer Schuhsohle mit durchtrittsicherer Einlage, b) vor der Prüfung  $t=0$  und c) während der Simulation  $t=0,1$  s

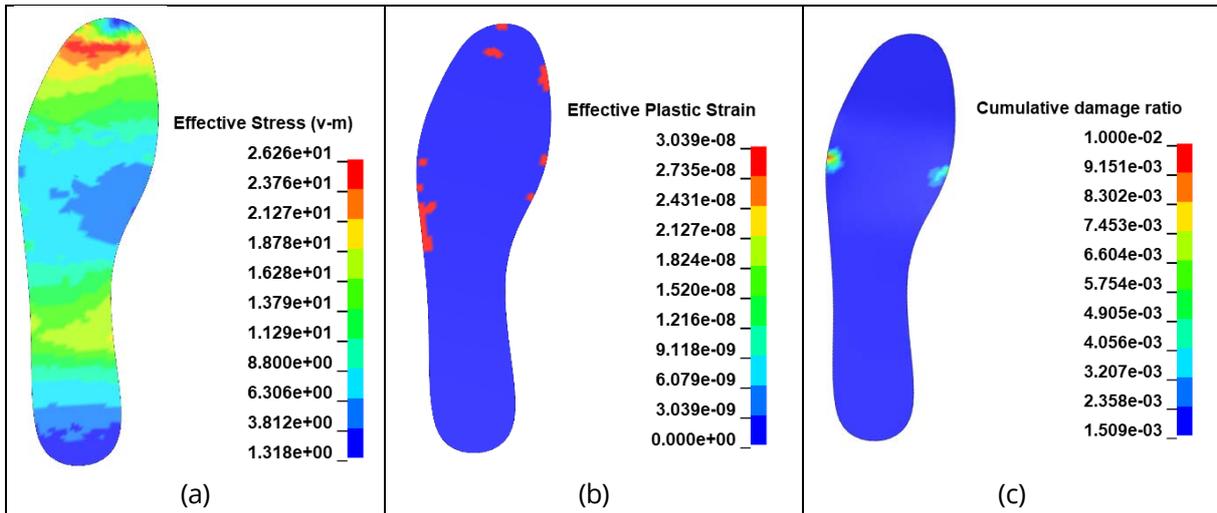


Abbildung 4-4: Ergebnisse für die Einlegesohle aus der Simulation eines Gesamtschuhs nach Abbildung 4-3: a) Vergleichsspannung in MPa bei  $t=0,1$ , (b) plastische Dehnung bei  $t=0,6$  und c) Schadensakkumulation nach Palmgren-Miner nach 3 Belastungszyklen

## 5 Zusammenfassung

Die weiterentwickelten Prüfmethode und die aufgestellten Material- und Simulationsmodelle liefern einen wertvollen Beitrag für die KMU der deutschen Schuhbranche. Die Notwendigkeit zur Durchführung von Simulationen bei der Schuhentwicklung erwächst aus den Anforderungen an die Schuhe in den Bereichen Komfort, Passform und im Bereich der Sicherheitsschuhe auch aus den gesetzlichen Anforderungen an die Sicherheit der Schuhe und an Schuhkomponenten. Durch eine simulationsbasierte Auslegung haben die Schuhhersteller den konkreten Nutzen, dass sie den Entwicklungsprozess für neue Schuhdesigns deutlich beschleunigen können und Entwicklungskosten senken können, da kosten- und zeitintensive Versuchsreihen deutlich reduzierbar sind. Die ökonomische Relevanz der Ergebnisse zur Erfüllung volkswirtschaftlicher und gesellschaftlicher Zielstellungen lässt sich wie folgt präzisieren:

- Ressourceneffizienz durch frühzeitiges Erkennen von potentiellen Schwachstellen an Schuhen gestattet ereignisorientiertes Verbessern des Designs oder Verwenden anderer Materialien,
- Steigerung der Sicherheit durch Nutzung des Modells zur Prognose des Materialverhaltens, insbesondere hinsichtlich des Versagens,

- Reduzierung des Materialeinsatzes infolge eines verbesserten Materialverständnisses führt zu erheblichen Einsparungen bei den Materialkosten sowie zu einem geringeren Verbrauch an Ressourcen,
- Neue Möglichkeiten zur Diversifizierung insbesondere in den KMU der Schuhbranche sowie in Zulieferindustrien der Bereiche Kunststofftechnik und Textiltechnik.

## 6 Literaturverzeichnis

- [1] Blatter M: Alles über Schuhe. Schweizerischer Schuhhändler Verband; 2003.
- [2] TÜV Rheinland: Prüfung von Schuhen und Lederprodukten, URL: <https://www.tuv.com/germany/de/schuhe-und-lederprodukte.html> (zuletzt besucht 31.08.2020).
- [3] TÜV Rheinland: Produktprüfungen, URL: <https://www.tuv.com/germany/de/über-uns-de/die-arbeit-von-tuv-rheinland/produktprüfungen/> (zuletzt besucht 31.08.2020).
- [4] Prüf- und Forschungsinstitut Pirmasens e. V.: Das Schuhsiegel – Mit Sicherheit Vertrauen schaffen, URL: <http://www.schuhsiegel.de/> (zuletzt besucht 31.08.2020).
- [5] Nickolaus G, Richter M: Schuhe auf dem Prüfstand – Messtechnische Prüfung und Bewertung von Kinderschuhen und Schuhmaterialien. 2004.
- [6] DIN EN ISO 20344 – Persönliche Schutzausrüstung – Prüfverfahren für Schuhe. 2013.
- [7] DIN EN ISO 17697: Schuhe - Prüfverfahren für Obermaterialien, Futter und Decksohlen - Nahtfestigkeit. 2016.
- [8] DIN EN 12568 - Fuß- und Beinschutz - Anforderungen und Prüfverfahren für durchtrittsichere Einlagen und Zehenkappen. 2010.
- [9] Fischer W, Nickolaus G: Schuhwerkstoffe – Prüfverfahren und Anforderungen, Prüf- und Forschungsinstitut für die Schuhherstellung, Pirmasens. 1987.
- [10] Döbrich O, Gereke T, Diestel O, Krzywinski S, Cherif C: Decoupling the bending behavior and the membrane properties of finite shell elements for a correct description of the mechanical behavior of textiles with a laminate formulation. Journal of Industrial Textiles, 2014, 44(1):70–84.

## Danksagung

Das IGF-Vorhaben 19657 BG der Forschungsvereinigung Prüf- und Forschungsinstitut Pirmasens e. V. (PFI; Marie-Curie-Straße 19, 66953 Pirmasens) wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages