

# Kurzfassung

## **Dynamische Schuhsimulation – IGF-Vorhaben 21374 BG**

### **Verfahrensentwicklung zur Auslegung von Arbeits- und Sicherheitsschuhen durch numerische Simulation unter Berücksichtigung dynamischer Belastungen**

In der heutigen Zeit sind Computer und Software in vielen Branchen unverzichtbar, um neue Produkte zu entwickeln. Auch in der Schuhindustrie werden CAD-Verfahren verwendet, um Modelle zu erstellen. Simulationsmethoden bieten zusätzlich die Möglichkeit, vorhandene Produkte zu optimieren und neue Produkte effizienter und kostengünstiger zu entwickeln. FEM-Systeme ermöglichen eine effiziente und zeitsparende Durchführung von Simulationen, im Gegensatz zu konventionellen Prüfmethode, die oft aufwendige und zeitintensive physische Tests erfordern. Des Weiteren werden durch den Einsatz von FEM-Systemen die Kosten für die Materialbeschaffung und den Prototypenbau reduziert. Virtuelle Tests ermöglichen es, verschiedene Szenarien und Designänderungen kostengünstig zu analysieren, bevor physische Prototypen hergestellt werden. Darüber hinaus bieten FEM-Systeme eine hohe Flexibilität bei der Modellierung und Analyse. Sie ermöglichen es, verschiedene Materialien, Geometrien und Belastungsszenarien zu simulieren und so eine detaillierte Bewertung des Verhaltens des Schuhs unter unterschiedlichen Bedingungen vorzunehmen. Die Anwendung von Simulationstechniken eröffnet weitere Vorteile für die Schuhindustrie. Durch den Einsatz von Simulationssoftware können verschiedene Aspekte eines Schuhmodells analysiert werden, wie beispielsweise mechanische Belastungen, Passform oder Haltbarkeit. Dadurch können potenzielle Probleme frühzeitig erkannt und behoben werden, noch bevor physische Prototypen hergestellt werden. Dies führt nicht nur zu Zeit- und Kostenersparnissen, sondern ermöglicht auch eine gezielte Optimierung des Produkts. Des Weiteren ermöglichen Simulationstechniken eine effizientere Entwicklung neuer Produkte. Durch die virtuelle Erprobung verschiedener Designs und Materialien können potenzielle Fehlerquellen frühzeitig erkannt und vermieden werden. Dies führt zu einer beschleunigten Markteinführung neuer Produkte und einer erhöhten Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen. Insgesamt ist der Einsatz von Computersystemen und Simulationstechniken in der Schuhindustrie von großer Bedeutung. Sie ermöglichen eine präzisere Modellentwicklung, eine verbesserte Produktqualität und eine effizientere Entwicklung neuer Produkte. Durch den Einsatz moderner Technologien können Schuhhersteller ihre Innovationsfähigkeit steigern und den Anforderungen des Marktes besser gerecht werden.

Um die Einstiegshürde für die KMU zu reduzieren, wurden im Projektverlauf entsprechende Arbeiten geleistet. Zu Projektbeginn wurden die benötigten Materialien sowie die zu prüfenden Demonstrationsschuhe festgelegt. Hierbei wurden die Fallhammerprüfung, die Überrollprüfung und die Flexibilitätsprüfung als dynamische Prüfungen ausgewählt, um mit den entsprechenden Simulationsergebnissen validiert zu werden.

Zur Digitalisierung benötigter CAD-Modelle z.B. Zehenschutzkappen (siehe Abbildung 1-D), Schuhkomponenten (siehe Abbildung 1-A und B) und komplexer Prüfeinrichtungskomponenten (z.B. Reifen eines Flurförderfahrzeugs) wurde der vorhandene 3D-Scanner „ATOS II“ der Firma „GOM – Optical Measuring Techniques“ verwendet.

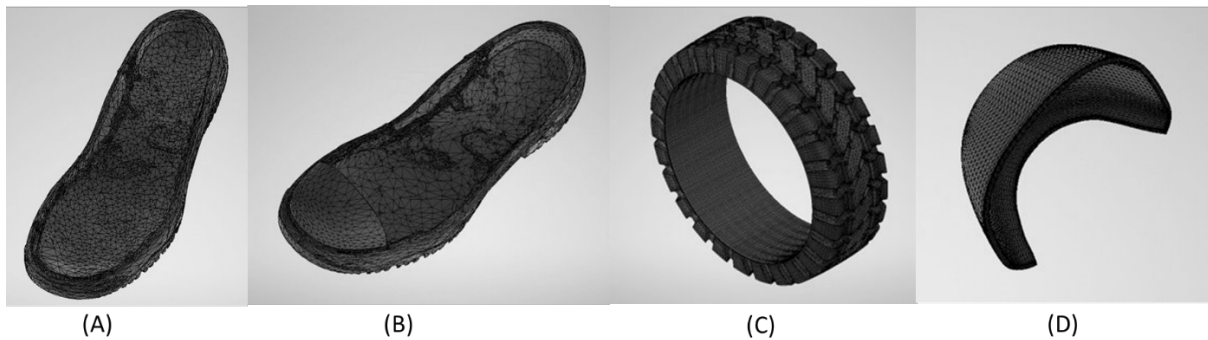


Abbildung 1: 3D gescannte Modelle, (A): Sicherheitsschuh; (B): Reifen; (C): Zehenschutzkappe

Die Verwendung von 3D-Scannern bietet eine Vielzahl von Vorteilen. 3D-Scanner ermöglichen eine hochpräzise Erfassung von dreidimensionalen Geometrien von Objekten. Dies ermöglicht eine genaue und detaillierte Reproduktion von Formen und Strukturen. Im Vergleich zu traditionellen manuellen Messmethoden ist die Verwendung eines 3D-Scanners schneller und effizienter. Der Scanner erfasst die Daten in kurzer Zeit und erzeugt ein vollständiges digitales Modell des gescannten Objekts. Des Weiteren können auch komplexe Geometrien und unregelmäßige Formen genau erfasst werden. Dadurch wird die Erfassung von organischen Formen, Freiformflächen und strukturierten Oberflächen erleichtert.

Um einen komplex aufgebauten Sicherheitsschuh in ein entsprechendes Modell zu überführen, wurde dieser in mehreren Schritten von außen nach innen, an den verschiedenen Materialschichten, abgetragen und digitalisiert. So entstand ein realistisches Modell eines Sicherheitsschuhs (siehe Abbildung 2).



Abbildung 2: 3D-Scan eines Sicherheitsschuhs

Auf Basis der in erstellten CAD-Modelle wurden Finite-Element-Modelle für die Fallhammer-, Überroll- und Flexibilitätsprüfung aufgebaut (siehe Abbildung 3). Die Teile der Prüfmaschine (Fallhammer, Reifen), die Schuhteile sowie das sich analog zu den Experimenten im Schuh befindliche Plastilin wurden mit Volumenelementen modelliert und vernetzt. Der Boden als Auflagerung für den Schuh und die Zehenschutzkappe wurden mit Schalenelementen modelliert. Eine kinematische Kopplung zwischen der Außensohle und der Zehenschutzkappe wurde angewendet. Die Randbedingungen wurden in Anlehnung an die vorhandene PFI-Norm für Überrollen (im Rahmen von IGF-Projekt 17636 N entwickelt) sowie DIN EN 12568 für die Fallhammerprüfung eingestellt. Das zusätzliche Plastilin hilft dabei, die Ergebnisse direkt mit dem

im Realversuch verwendeten Plastilin zu vergleichen, die nach der Prüfung mit Hilfe eines 3D-Scanners gescannt werden.

Das Modell für die Flexibilitätsprüfung wurde in Anlehnung an das Prüfprinzip aufgebaut (siehe Abbildung 3). Dabei wurden zwei Innenteile und die Werkzeuge mit Schalenelementen als Festkörper modelliert. Der Gummistiefel wurde mit Solid-Elementen modelliert. Die Randbedingungen für die Simulation wurden in Anlehnung von den Prüfbedingungen eingesetzt. Die FEM-Modelle der drei ausgewählten Prüfungen wurden erfolgreich erstellt.

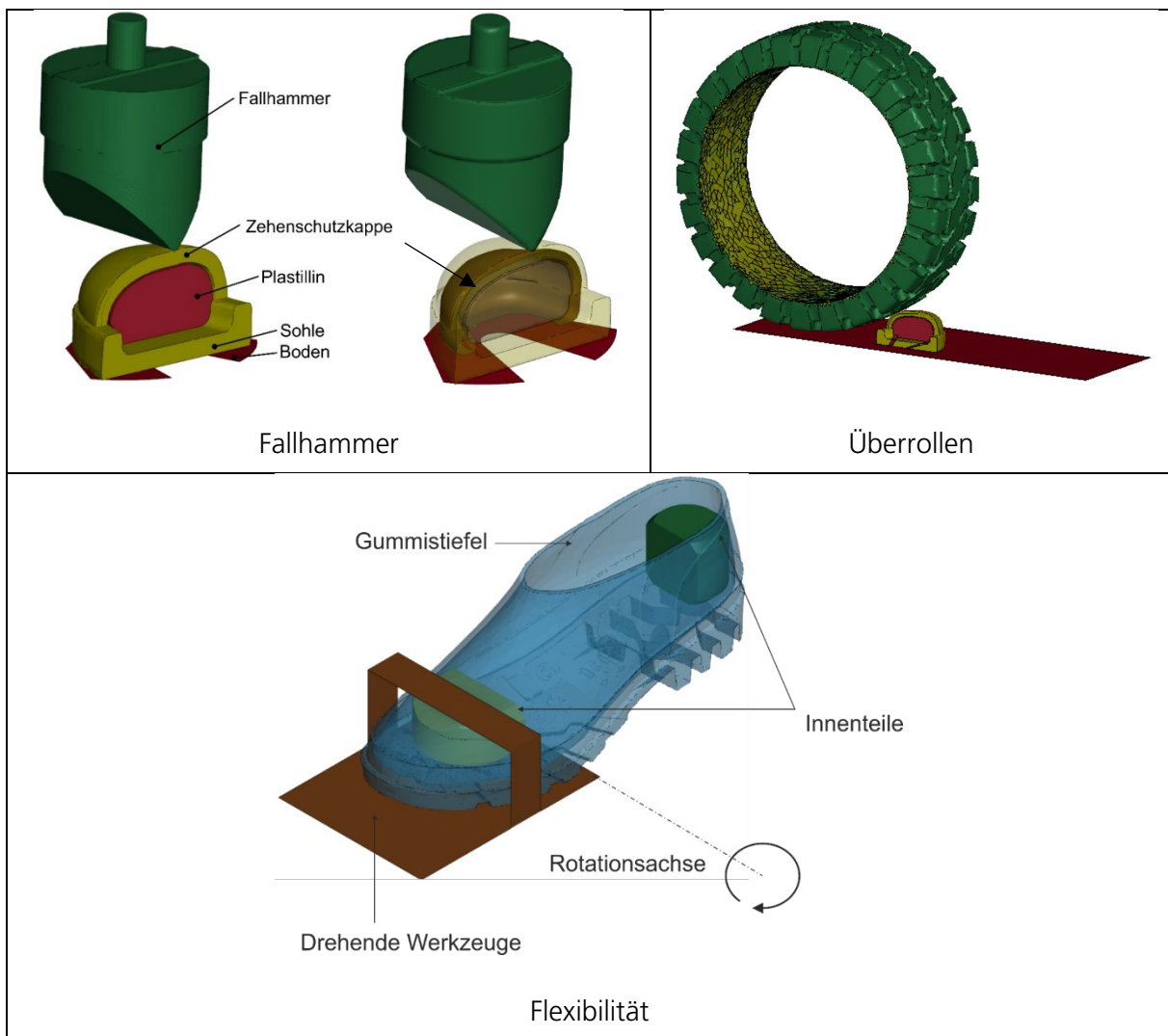


Abbildung 3: FEM-Modelle der Fallhammer-, Überroll- und Flexibilitätsprüfung

Im Folgenden wird die Durchführung der Realversuche und der Simulationsdurchführung zu der Fallhammerprüfung beschrieben.

Die Fallhammerprüfungen wurden mit einer PFI-eigenen Apparatur unter Einhaltung der Prüfnorm EN ISO 20345 durchgeführt. Der zu prüfende Sicherheitsschuh wurde laut Normvorgaben vom Schaft getrennt und die Schuhsohle gekürzt. Anschließend wurde der Hohlraum zwischen der Zehenschutzkappe und der Schuhsohle mit Plastilinmasse gefüllt und in der Prüfmaschine mit der vorgegebenen Haltegabel fixiert (siehe Abbildung 4). Anschließend wurde der Versuch aus einer Fallhöhe von 1 m durchgeführt. Nach dem Versuch wurde der deformierte Plastilinkörper an der Luft getrocknet und mithilfe eines 3D-Scanners digitalisiert (siehe Abbildung 4).

Im Modell wurden die gleichen Randbedingungen wie im Versuch eingesetzt. Die Simulation fängt aber bei dem Zeitpunkt kurz vor dem Impact an. Um die kinetische Energie vergleichbar mit dem Experiment einzustellen, wurde die Geschwindigkeit des Fallkörpers folgendermaßen kalkuliert:

$$PE = mgh$$

$$KE = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

$$v = \sqrt{2gh}$$

$PE$  ist darin die potentielle Energie der gesamten fallenden Baugruppe bei einer Höhe  $h$  (nicht nur der Hammer),  $m$  ist die Masse der gesamten fallenden Baugruppe,  $g$  ist die Erdbeschleunigung ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ),  $KE$  ist die kinetische Energie bei der Geschwindigkeit  $v$ . Laut dem Energieerhaltungssatz der Mechanik (Energiesatz) ist  $KE$  bei Impact gleich  $PE$ , deswegen kann die Geschwindigkeit  $v$  des Hammers kurz vor dem Impact einfach mit Hilfe der Gleichungen (1) mit bekannter Höhe  $h$  (hier Fallhöhe  $h = 1 \text{ m}$ ) berechnet werden. Da im Modell nur der Hammer modelliert ist, nicht die ganze fallende Baugruppe, muss die Dichte des Materialmodells für den Hammer künstlich erhöht werden, damit die  $PE$  im Modell vergleichbar mit der Realität ist.

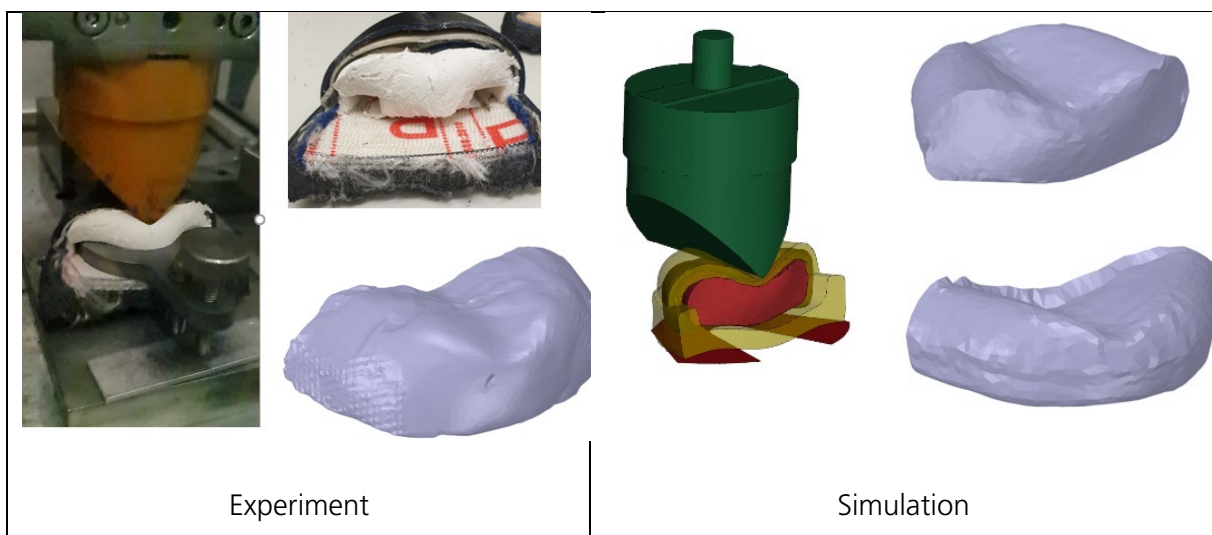


Abbildung 4: Vergleich zwischen Experiment und Simulation der Fallhammerprüfung

Abbildung 4 zeigt den Vergleich der Simulationsergebnisse mit den experimentell ermittelten Daten. Weitere numerische Untersuchungen wurden durchgeführt, um verschiedene Einflussparameter der Zehenschutzkappen zu analysieren. Die FEM-Modelle bilden dabei sehr gut die realen Bedingungen ab und können die Resthöhe nach der Prüfung vorhersagen.

Insgesamt eröffnen die Forschungsergebnisse den schuherstellenden KMU neue Möglichkeiten, ihre Wettbewerbsfähigkeit zu stärken und ihre Position auf dem Markt zu verbessern. Sie bieten eine solide Grundlage für die Entwicklung innovativer Produkte und die Gewährleistung einer hohen Qualität und Kundenzufriedenheit. Die Forschungsergebnisse tragen dazu bei, dass die Unternehmen den Herausforderungen der Branche besser gewachsen sind und ihre Produkte den ständig wachsenden Anforderungen gerecht werden.

**Dankssagung:**

Das IGF-Vorhaben 21374 BG der Forschungsvereinigung Prüf- und Forschungsinstitut Pirmasens e.V., Marie-Curie-Straße 19, D-66953 Pirmasens, wurde über das AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Ferner danken wir den zahlreichen Unternehmen für die Bereitstellung von Versuchsmaterialien sowie für die Begleitung der Arbeiten mit Beratung und Unterstützung.

**Projektpartner**

TU Dresden

Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik

George-Bähr-Straße 3c

01062 Dresden