

# Schuhsohlen: Technik, Anforderungen und Prüfungen

*Ein 360°-Blick aufs Thema Sohlen, ihre Funktion, welche Tests für ihre Gebrauchstauglichkeit und Sicherheit durchgeführt werden und welche aktuellen Forschungsprojekte an PFI und ISC laufen, die sich primär oder in Teilbereichen mit Sohlen befassen.*

## Grundsätzliche Funktion von Schuhsohlen

Neben modischen Aspekten haben Sohlen – wie Schuhe auch – in erster Linie die Aufgabe, unangenehme oder gar schädliche Umwelteinflüsse von den Füßen fernzuhalten. Als Schnittstelle zwischen Schuhträger und Untergrund ist eine Schuhsohle einer Fülle physikalischer und chemischer Einflüsse ausgesetzt und muss:

- dauerhaft der Einwirkung mechanischer Kräfte infolge des Körpergewichts des Trägers und der Abrollbewegung beim Gehen standhalten
- den Fuß gegen Verletzungen schützen, beispielsweise durch spitze Steine oder andere widrige Bodenbeschaffenheiten, und eventuell sogar gegen das Eindringen von Nägeln oder die Einwirkung von Chemikalien
- den Fuß vor Hitze, Kälte und Nässe schützen
- Rutschfestigkeit beziehungsweise Griffbarkeit auf jedem Untergrund gewährleisten
- je nach Schuhtyp elektrisch isolierend oder teilleitfähig sein (Arbeits- und Sicherheitsschuhe)
- je nach Schuhtyp und Einsatzzweck die Leistung des Trägers fördern (Sportschuhe)

All dies sollen Sohlen leisten, ohne den natürlichen Gang zu behindern oder negativ zu beeinflussen, und darüber hinaus sogar so, dass das Gehen, Laufen und Stehen gegenüber dem Barfußlaufen optimiert oder korrigiert wird.

Die ideale Schuhsohle erfüllt alle Schutzfunktionen, wiegt fast nichts, ist superelastisch, formbeständig, lässt dem Schuhdesigner alle Freiheiten, quillt nicht, kennt keine chemische Auflösung, hat eine perfekte Bodenhaftung sowie null Verschleiß und hält ewig. Am Ende des Schuhlebens lässt sie sich problemlos vom Schuh trennen und recyceln. Und nicht zu vergessen: Der Anteil der Sohle am Gesamtpreis des Schuhs soll möglichst wenig ins Gewicht fallen.

Die Liste der Anforderungen lässt es vermuten: eine solche Wundersohle gibt es nicht. Aber es gibt Sohlen, die an die unterschiedlichen Aufgaben und Schuhtypen sehr gut angepasst sind und von denen manche der idealen Sohle sogar recht nahekommen.

## Herstellung

Funktion, Material, Aufbau und Herstellungsmethode einer Sohle hängen miteinander zusammen und können nicht unabhängig voneinander frei kombiniert werden. Bei der großen Mehrheit der weltweit hergestellten Schuhe werden Schaft und Sohle in getrennten Prozessen und meist auch geografisch getrennt produziert. Es gibt allerdings auch Schuhe, bei denen die Sohle und Schuhober-

teil als untrennbare Einheit hergestellt werden, wie Polymerstiefel, Schwimmschuhe, Badesandalen oder andere Kunststoffsandalen, die als Monomaterialprodukte im Spritzgussverfahren kostengünstig hergestellt werden können, oder auch mittlerweile – teurer, aber dafür eventuell individualisiert – mit dem 3D-Drucker.

Die meisten Sohlen werden industriell als eigenständige Schuhkomponenten hergestellt und in der Schuhfabrik im Prozessschritt der so genannten Montage mit dem Schuhoberteil dauerhaft verbunden. Die am häufigsten verwendete Fügemethode ist Kleben. Bestimmte Schuhkonstruktionsarten, wie die flexible oder die rahmengenähte Machart, sehen das Nähen vor. Hierfür werden meist Ledersohlen benutzt, die leicht ausgetauscht werden können, wenn sie abgenutzt sind. Gerade maßgefertigte Schuhe haben oft angenähte Sohlen und können somit neu besohlt werden, was ihre Lebensdauer verlängert und sie nachhaltiger macht.

Eine industrielle Alternative zum Verkleben der Sohle mit Klebstoff ist das so genannte Direktbesohlen. Bei dieser Methode wird die Laufsohle im Spritzgussverfahren direkt an das fertige Schuhoberteil angeformt und gleichzeitig befestigt. Wie bei den meisten werkzeuggebundenen Urformverfahren werden hierfür stabile Metallformen benötigt. Die nicht unerheblichen Formenkosten müssen auf die Stückzahl der produzierten Schuhe umgelegt werden.

Die meisten Sohlen werden mit Polymerwerkstoffen im Spritzgussverfahren hergestellt. Doch nicht alle Sohlengeometrien und -strukturen lassen sich technisch über Spritzgussformen abbilden. Im Orthopädiebereich werden Sohlen individuell je nach Fußform und Befund angepasst. Dementsprechend kommen hier bearbeitbare Sohlenmaterialien, Schuhkonstruktionen und Techniken zum Einsatz, die bezahlbar bleiben, was die Herstellung individueller Spritzgussformen meist ausschließt.

Individualisierte Sohlen, Sohlen mit komplexen Strukturen oder Texturen beziehungsweise Sohlen mit individuell angepassten Dämpfungszonen können dank der Fortschritte bei den Druckmaterialien mittlerweile per 3D-Druck hergestellt werden, wobei allerdings die Materialauswahl für dauergebrauchstaugliche Sohlen immer noch eingeschränkt ist.



*Abb. 1: Die im EU-Forschungsprojekt ADDFactor im Jahr 2014 per 3D-Druck hergestellte Laufsohle eines Sportschuhs auf einer PFI-Flexibilitätsprüfmaschine im Dauertest*

## Materialien

Entscheidend für Funktion, Performance und Aussehen von Sohlen sind die Materialien, aus denen sie aufgebaut sind. Aufgrund der unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften, Rohstoffkosten und Verarbeitbarkeit der Materialien sind Schuhsohlen meist Verbundkonstruktionen.

Die unterste Sohlenschicht, die eigentliche Außen- oder Laufsohle, muss besonders abriebfest sein. Dafür eignen sich thermoplastisches (spritzgussfähiges) Polyurethan-Material (TPU) beziehungsweise thermoplastischer Gummi (TPR) oder vulkanisierter Gummi, und zwar entweder synthetischer Kautschuk wie Styrol-Butadien-Kautschuk (auf Englisch *Styrene-butadiene rubber*, kurz SBR), Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (*Ethylene propylene diene monomer rubber*, kurz EPDM) oder Nitrilkautschuk (*Nitrile-butadiene rubber*, kurz NBR), wenn chemische Beständigkeit gegen Kraftstoffe gefordert ist.

Weitere Werkstoffe für Laufsohlen sind Leder, Textil, Naturkautschuk / Latex, Korkverbünde, Holz und Polyvinylchlorid (PVC).

Es besteht ein Zusammenhang zwischen Materialdichte und Abriebfestigkeit, so dass die Dichten von Außensohlenmaterialien relativ hoch sind. SBR beispielsweise hat eine Dichte von etwa 1,2 bis 1,4 g/cm<sup>3</sup>, NBR von etwa 1,2 bis 1,4 g/cm<sup>3</sup>. Um Gewicht zu sparen werden Außensohlen also relativ dünn gehalten. Die Sohlenhöhe wird dann mit leichteren und nebenbei auch kostengünstigeren Zwischensohlenmaterialien aufgebaut. Sie optimieren die Dämpfungs- und Komforteigenschaften der Schuhe und erlauben die gewünschte Schuhsprengrung aufzubauen. Für Zwischensohlen findet am häufigsten Polyurethan Anwendung (PU, Dichte etwa 0,3 bis 0,6 g/cm<sup>3</sup>) und an zweiter Stelle Ethylen-Vinyl-Acetat (EVA, Dichte etwa 0,9 g/cm<sup>3</sup>), das aufgrund guter Abriebwerte auch für die Lauffläche geeignet ist. Die gute mechanische Bearbeitbarkeit macht EVA für die Orthopädienschuhtechnik interessant. Daneben wird hier auch Leichtgummi (Dichte 0,3 bis 0,5 g/cm<sup>3</sup>) eingesetzt.

Schuhe mit geklebter Laufsohle haben häufig eine Brandsohle aus Leder, Karton, Lederfaserstoffen oder anderen Verbundmaterialien.

Die Geometrie der Fußsohle wird über eine – im Orthopädiebereich üblicherweise individuell angepasste – Einlegesohle definiert.

Eine eventuell vorhandene Decksohle aus Textil oder Leder stellt den direkten Kontakt zur Socke oder zur Haut des Fußes her.

Sohlenhersteller können die Materialeigenschaften wie auch die Kosten von Sohlen über den Spritzgussprozess und durch Füllstoffe beeinflussen.

Neben der Dichte ist die Härte der Sohlenmaterialien eine wichtige Kenngröße. Für Sohlenkunststoffe wird die Härte üblicherweise in SHORE D angegeben (beispielsweise EVA 40, TPU 75). Die ermittelte Härte entspricht der Eindringtiefe eines definierten harten Dorns in die Materialober-

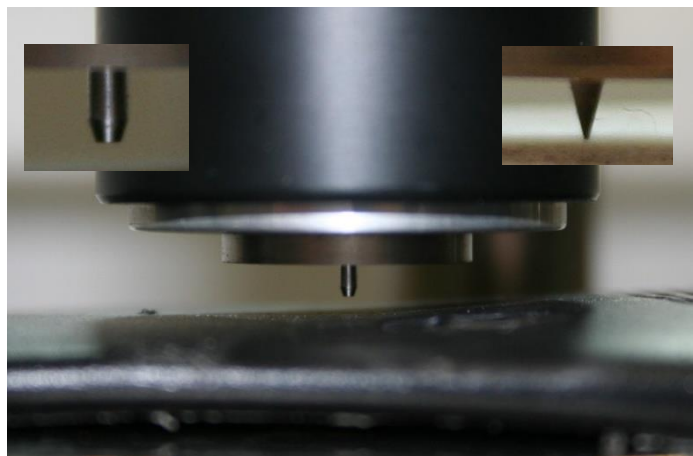


Abb. 2: Messung der Härte einer Laufsohle nach Shore C mit abgeflachter Spitze (links oben). Eingebildet auch die Spitze nach Shore D (rechts oben).

fläche bei definierten Kräften. Dorn und jeweilige Eindringtiefe variieren entsprechend der Härteskala. Die Härte von Spritzgussteilen wird – ebenso wie die Dichte von Kunststoffen – über Material, Spritzgussdruck, Temperatur und weitere Faktoren bestimmt.

Zu beachten ist, dass die Härte eine Eigenschaft beschreibt, die an der Oberfläche eines Körpers gemessen wird. Über die physikalischen Eigenschaften einer Sohle, wie Dämpfung und Steifigkeit, entscheiden vor allem Sohlenstruktur und Konstruktion. Die Steifigkeit eines ganzen Schuhs hängt außerdem auch von der Art der Befestigung der Sohle am Schuh ab.

## Qualität

Wie alle Gegenstände des täglichen Bedarfs müssen natürlich auch Schuhe die Erwartungen des Verbrauchers erfüllen. Die Sohle sollte nicht vor der erwarteten Nutzungsdauer auflösen. Ein Ziel der Qualitätskontrolle ist, solche Ausfälle vor Ablauf der zu erwartenden Nutzungsdauer auszuschließen. Gründe, welche die Nutzungseignung einer Sohle am Schuh beenden, sind:

- durch Belastung eintretende Schäden, beispielsweise ein Riss in der Laufsohle, Bruch der Sohle oder einer Komponente wie des Gelenks oder Durchtrittschutzes
- durch Nutzung zu erwartende Veränderungen an der Sohle, wie beispielsweise Verschleiß durch Sohlenabrieb
- vorzeitige Alterung, beispielsweise eine sich auflösende oder abfallende Sohle, weil die Klebung nicht dauerstabil ist oder weil Hydrolyse der Zwischensohle zugesetzt hat

In den Labors des PFI werden täglich mögliche Ausfallursachen an Schuhen und Sohlen überprüft, und zwar fast immer an neuen Schuhen, also bevor sie in Verkehr gebracht werden. Die Aufgabe besteht darin, mittels Prüfungen im Neuzustand Mängel aufzudecken, welche die zu erwartende Nutzungsdauer einschränken könnten. Generell sollen so aber auch Mängel identifiziert werden, die ein Inverkehrbringen infolge gesetzlicher Vorgaben verbieten oder riskant machen, weil für den Händler oder Hersteller erhöhtes Reklamationsrisiko besteht. Gründe, die das Inverkehrbringen verbieten, sind Schadstoffe im Schuh oder das Nichteinhalten standardisierter technischer Vorgaben aus Normen, speziell im Bereich Persönlicher Schutzausrüstung (PSA).

Schuhe müssen im Lauf ihres Lebens eventuell hunderttausende von Schritten mitmachen. Prüflabors testen daher nicht nur die Eigenschaften von Schuhen im Neuzustand, sondern auch die Dauergebrauchstauglichkeit. Allerdings müssen mögliche Ausfälle im Labor in Tagen oder gar Stunden, also praktisch im Zeitraffer, festgestellt werden. Insbesondere für Verschleißaussagen müssen die physikalischen Belastungen an Schuh und Sohle gegenüber der normalen Nutzung deutlich erhöht werden, um innerhalb einer kurzen Zeitspanne treffende Aussagen machen zu können. Eine Laufsohle wird hierbei zum Beispiel vor der Dauerbelastungsprüfung mit Einstichen gezielt beschädigt. Beurteilungskriterium ist dann das Risswachstum infolge von Biegebelastung in einer normierten Maschine.

Durchtrittsichere Einlegesohlen aus Metall beispielsweise werden mit einer Frequenz von 16Hz eine Million Mal gebogen, um Brüche beim Abrollen während des Gehens festzustellen. Für Polymerwerkstoffe lassen sich derart hohe Prüffrequenzen nicht anwenden; sie würden sich zu stark erwärmen und damit die Aussagekraft der Prüfungen in Frage stellen.

Ein Beispiel, das die Notwendigkeit beschleunigter Alterungstests im Labor deutlich macht, werden nicht wenige aus eigener Erfahrung kennen: Ein Paar Schuhe, das länger unbenutzt im Schrank stand,

wird beim Anziehen noch als einwandfrei empfunden, aber dann fühlt sich das Gehen „komisch“ an und man muss beobachten, wie die Zwischensohle eines oder beider Schuhe zerbröseln. Die Ursache hierfür ist Hydrolyse – das Auflösen polymerer Verbindungsstrukturen durch Wasserdampf und Wärme –, die insbesondere bei PU-Sohlen auftreten kann. Simuliert wird künstliche Sohlenalterung im Labor durch Beaufschlagen mit erhöhter Temperatur, Luftfeuchtigkeit und starkem UV-Licht.

Weitere typische Mängel, die im PFI an Sohlen immer wieder festgestellt und auf die entsprechend geprüft werden, sind

- Bruch der Laufsohle
- Ablösen der Sohle vom Schuh
- Ablösen des Absatzes
- Brechen des Absatzes bei hochgesprengten Schuhen
- Bruch des Gelenks
- Farbveränderungen
- erhöhter Abrieb
- nicht ausreichende Gleitsicherheit
- nicht ausreichende Wasserdichtigkeit

An Sicherheitsschuhen kommen noch weitere Fehlerquellen beziehungsweise Prüfungen hinzu, beispielsweise

- nicht ausreichender Schutz vor Nageldurchtritt / Bruch der durchtrittssicheren Einlegsohle
- zu hohe oder zu niedrige elektrische Leitfähigkeit
- ungenügende Isolation gegen Hitze und Kälte
- zu geringe Energieaufnahme / Dämpfung im Fersenbereich

Wichtige Gebrauchseigenschaften von Schuhsohlen sind die Gleitsicherheit und das Abriebverhalten. Sie können nach verschiedenen Verfahren geprüft werden. Nach der Sicherheitsschuhenorm ISO 20344 etwa wird Gleitsicherheit über ein Maschinenverfahren geprüft, das im Wesentlichen einen Gleitkoeffizienten unter definierten Bedingungen ermittelt. Dabei wird der zu prüfende Schuh mit definierter Kraft auf eine eventuell mit Gleitflüssigkeit benetzte Stahlplatte oder Fliese aufgesetzt und relativ zum Boden mit konstanter Geschwindigkeit bewegt. Erfasst werden die Horizontalreibkräfte, über die ein gemittelter Reibkoeffizient ermittelt wird.



Abb. 3: Sohlenbruch nach Dauerbiegeprüfung im PFI-Labor



Die Ermittlung des Abriebwiderstandes erfolgt nach DIN ISO 4649, indem die Masse des Abriebs eines feststehenden, zylindrischen Prüfkörpers aus dem zu prüfenden Sohlenmaterial beim Bewegen über einen drehenden, auf einer Walze aufgebrachten Schmirgelbogen ermittelt wird.

Die Einflüsse der Sohlengeometrie und des Sohlenprofils auf Abrieb und Gleitsicherheit wurden in einem Forschungsprojekt am PFI untersucht und hieraus Gestaltungsrichtlinien abgeleitet. In einem selbst konstruierten Kontaktflächenmessgerät wurden die Einflüsse von Kontaktflächen und Profilkanten untersucht sowie Stauchungseffekte während des Gleitvorgangs ermittelt.

Insbesondere bei feuchtem Untergrund sind die führenden Profilkanten sehr wichtig (Scheibenwischereffekt). Ein nachträgliches leichtes Abschleifen scharfer Kanten führte zu signifikant reduzierten Reibkoeffizienten. Über eine Sohle, die nach dem Baukastenprinzip hergestellt werden kann, wurden die Einflüsse von Profilformen, Oberflächenhärten, Mikrostruktur der Oberflächen und Kontaktflächen untersucht. Kleinere Kontaktflächen zeigten bessere Reibwerte, aber infolge höherer Drücke auch höheren Abrieb.

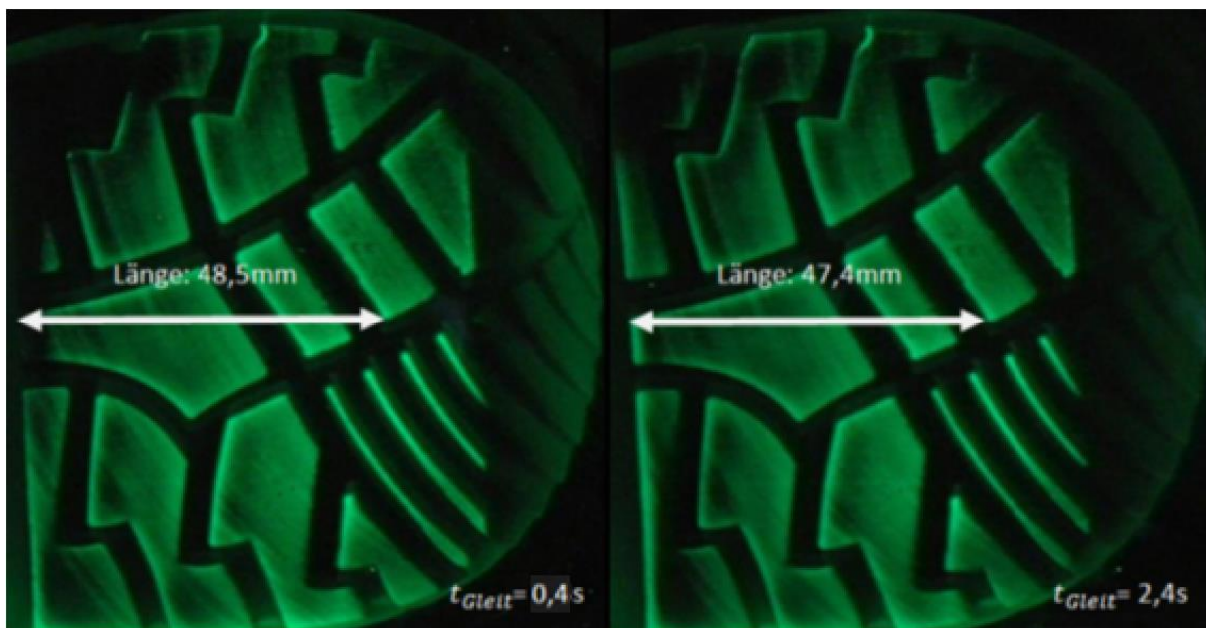


Abb. 4: Bild der Kontaktfläche einer Sohle zu Anfang und in der Mitte des Gleitvorgangs auf einer PFI-Gleitsicherheitsprüfmaschine. Aus dem Forschungsprojekt AiF 1761N – Sohlenkonstruktionsrichtlinien im Hinblick auf optimierte Gleitsicherheit und Bruchfestigkeit.

### Eintauchschutz von Kappen



Abb. 5: Abtauchen der Zehenschutzkappe in die Laufsohle unter steigender Druckbelastung beim Überrollen (Schlussbericht zu AiF-Projekt 17636)

Eine wesentliche Anforderung an Sicherheitsschuhe ist der Schutz der Zehen vor herabfallenden Gegenständen oder schweren Gewichten, wie in ISO 20345 beschrieben. Es ist nachvollziehbar, dass diese Anforderung die Schutzkappen direkt betrifft. ISO 20344 beschreibt einen Fallversuch, bei dem die Verformung des Schuhs im Vorfußbereich während der gesamten Belastungsdauer begrenzt sein muss. Dazu wird im Schuhinneren unter der Kappe ein Plastilinzylinder platziert, der das tatsächliche Einsinken der Kappe erfasst, auch wenn sich die Kappe nach der Belastung ganz oder zum Teil wieder zurückstellt.

Auf den ersten Blick weniger ersichtlich ist, dass auch die Sohle einen signifikanten Beitrag zum Schutz des Vorfußes leisten muss.

Auch wenn klassische Zehenschutzkappen gut vor Verletzungen durch schwere Gegenstände schützen, die von oben auf den Vorfußbereich des Schuhs fallen, ist die Schutzfunktion nicht gegeben, wenn der Fuß überfahren wird.

In einem Forschungsprojekt hat das PFI untersucht, wie sich Zehenschutzkappen verhalten, wenn ein Stapler den Vorfuß überrollt. Es zeigte sich, dass sich die Kappen unter Umständen sehr weit in die Sohle oder gar mit der Sohle in den Boden drücken – mit fatalen Folgen für den Vorfuß des Trägers, den die Gegenkraft, die von unten über die Sohle auf den Fuß einwirkt, verletzt und schlimmstenfalls zerquetscht. Material und Konstruktion der Sohle und insbesondere die Ankopplung der Kappen sind hier relevant.

An den Prüfungen nach ISO 20344 wird auch der Unterschied zwischen dem Prüfen mit dem Fallhammer (der das Herabfallen eines schweren Gegenstands nachstellt) bei einer vorgegebenen Energie (100J oder 200J) und mit dem Druckstempel (der ein Überrollen simuliert) mit einer vorgegebenen Kraft (10kN oder 15kN) deutlich. Im Fallhammer-Test wird die kinetische Energie der fallenden Masse dynamisch in Verformungsarbeit umgesetzt. Die Verformungsarbeit bewirkt blei-



Abb. 6: Druckversuch nach ISO 20344 – hier 5 kN

bende Verformung, Wärme und zu einem kleinen Teil Rückprall. Letztendlich muss die Energie irgendwo umgesetzt werden: In der Kappe, in der Sohle oder – hoffentlich nicht – im Plastilinzylinder (Fuß), auch wenn die Zehenschutzkappe unendlich steif ist. Bei dem Druckversuch würde bei unendlich steifem Schuhaufbau keine Energie umgesetzt, da keine (Verformungs-) Arbeit verrichtet wird. Schuhe sind aber nicht unendlich steif, insbesondere Sohlen im Vergleich zu Schutzkappen sind dies nicht, so dass die Druckkraft über die endliche Steifigkeit der Sohle ein Eindringen der Schutzkappe bewirkt, was wiederum Energie in die Sohle einbringt, die letztendlich bei Rückstellen teilweise wieder ans Bewegungssystem zurückgegeben wird, als Wärme in der Sohle verbleibt oder bleibende Verformungen (Brüche) in der Sohle verursacht.

### **Schutz vor dem Eindringen spitzer Gegenstände**

Neben dem Schutz des Fußes von oben müssen Sicherheitsschuhe die Füße vor dem Eindringen spitzer Gegenstände – wie Nägeln – von unten durch die Sohle schützen. Dies ist ebenfalls in ISO 20345 beschrieben und wird mit dem so genannten Nageldurchtritt-Versuch geprüft: Nägel mit festgelegter Geometrie werden an vier oder fünf verschiedenen Stellen langsam (mit einer Geschwindigkeit von 10 mm/min) in die Sohle gedrückt. Je nach Material des Durchtrittschutzes und des Nagels wird die Maximalkraft herangezogen, die immer größer als 1,1 kN sein muss, oder mit einer definierten Kraft (1,1 kN) gedrückt, ohne dass die Nagelspitze nach innen durchdringen (sichtbar werden) darf.

### **Elektrischer Durchgangswiderstand**

Der elektrische Durchgangswiderstand einer Sohle beschreibt, welcher Strom fließt, wenn eine elektrische Spannung zwischen dem Körper des Trägers und dem Untergrund besteht. Schon ein Strom von wenigen Milliampere kann dem Menschen gefährlich werden. Daher sollte der elektrische Widerstand von Schuhen zum Schutz vor einem elektrischen Schlag, beispielsweise bei Elektroarbeiten, möglichst groß sein. Ein hoher elektrischer Widerstand der Sohlen wiederum erhöht die Neigung zu elektrischer Aufladung. Der elektrische Widerstand im Sinne geringer antistatischer Aufladung und zum Schutz elektrostatisch gefährdeter Bauteile (ESD) sollte aber möglichst klein sein. Reale Werte liegen im Bereich von 10 M $\Omega$  (10<sup>7</sup> Ohm) bis 10 G $\Omega$  (10<sup>10</sup> Ohm). Beteiligt an elektrostatischer Aufladung sind immer die Reibpartner Bodenbelag und Schuhsohle.

In einem aktuellen Forschungsprojekt untersucht das PFI zusammen mit dem Teppichforschungsinstitut in Aachen und dem Dresdner Institut für Holztechnologie die Möglichkeit, die elektrischen Aufladeigenschaften von Bodenbelägen in einem Maschinenverfahren überprüfbar zu machen.

### **Performance**

In der Orthopädienschuhtechnik ist die Funktionalisierung und Anpassung eines Schuhs auf die Bedürfnisse und Anforderungen des Trägers über Sohlen und Einlegesohlen tägliche Praxis. Oft entstehen komplexe individualisierte Schuhböden entstehen.

Aber auch bei nicht-orthopädischen Schuhen wird in das Sohlendesign viel Aufwand gesteckt. Angetrieben vom Anspruch auf hohe Produktperformance bei ansprechendem, modischem Design und im Sicherheitsschuhbereich zusätzlich noch von gesetzlichen Vorgaben, entstehen sowohl konstruktiv als auch materialtechnisch anspruchsvolle Sohlen.

Insbesondere Sportschuhhersteller innovieren permanent gerade die Sohlen, um Schuhe noch leichter und die Dämpfung noch effektiver zu machen, um dem Träger in der Abhebephase gespeicherte Bewegungsenergie beim Aufsetzen wieder zurückzugeben und um die Traktion beim Beschleunigen und Bremsen an die Erfordernisse der jeweiligen Aktivität anzupassen. So hat jede Sportart ihren ganz speziellen Schuhtyp. Entsprechend vielfältig sind die möglichen Aufbauten von Schuhsohlen.

Neben durch Prüfen erfassbaren Mängeln gibt es weitere messbare Eigenschaften von Sohlen, die sich auf Komfort, Funktionalität und Performance der Schuhe auswirken. Beispielsweise sind dies

- Gewicht der Sohle



- Dicke der Sohle
- Dämpfungseigenschaften (insbesondere im Fersenbereich)
- Härte der Sohlenoberfläche
- Flexibilität der Sohle
- Passformrelevante Parameter (wie Schuhlänge, Weite, Sohlenkonstruktionsmaße)
- Klimaparameter (wie thermisches Isolationsvermögen, Wärmekapazität)
- Wasserdichtigkeit

Geringes Gewicht eines Schuhs ist eine Eigenschaft, mit der gerne geworben und in die auch erhebliche Entwicklungsarbeit investiert wird. Eine überschlägige Rechnung zeigt, dass selbst geringe Einsparungen von wenigen Gramm am Schuh im Hochleistungssport bei hohen Geschwindigkeiten und Schrittfrequenzen zu messbaren Leistungssteigerungen führen.

Die Dämpfungseigenschaften einer Sohle lassen sich statisch und dynamisch messen. Es darf bezweifelt werden, ob der Test einer Energieaufnahme mit einem Druckstempel, der sich mit 10 mm/min bewegt (wie für die Prüfung der Energieaufnahme im Fersenbereich von Sicherheitsschuhen zum Schutz vor Fersenbeinbrüchen), geeignet ist, Aussagen zur Performance zu machen. Aussagekräftiger sind Versuche, mit denen die Energieabsorption und Kraftverläufe eines Fallversuchs erfasst werden.

In Abb. 7 ist der Verlauf der Kraft während des Aufsetzens eines fersenförmigen metallenen Prüfkörpers auf den Absatzbereich einer Sohle über der Eindringtiefe dargestellt und zum Vergleich der Verlauf einer linearen Feder, gemessen jeweils mit einer PFI-Schockabsorptions-Prüfmaschine.

Die Fläche zwischen der s-Achse (Weg) und der roten Kurve (Kraft) stellt die Energie dar, die durch die fallende Masse in die Ferse eingebracht wird. Die Fläche zwischen der s-Achse und der grünen Kurve ist die Energie, die von der Sohle wieder zurückgegeben wird. Dementsprechend repräsentiert die durch die rote und die grüne Kurve umrahmte Fläche die von der Sohle absorbierte – und in Wärme umgewandelte – Energie. Die inneren schwarzen Kurven beschreiben den zweiten und dritten Aufprall bis zum Ausschwingen bei einem durch das Gewicht der fallenden Masse und die Steifigkeit der Sohle bestimmten Punkt.

Bei der linearen Feder ist zu sehen, dass hier fast keine Energie absorbiert wird und eine entsprechend hohe Anzahl an weiteren Aufschlägen auf die Feder auftritt. Die Steigung der Kurve entspricht der Federkonstante nach dem aus dem Physikunterricht bekannten Hooke'schen Gesetz.

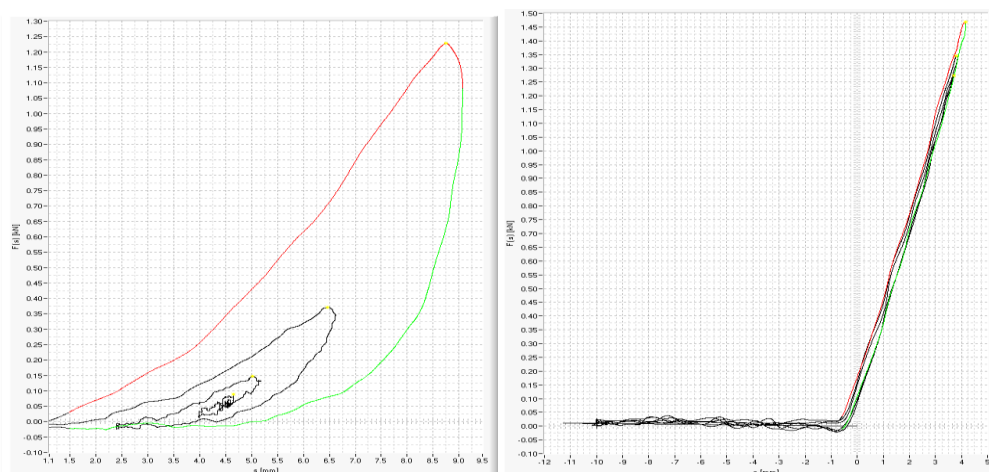


Abb. 7: Typisches Kraft-Weg-Diagramm einer Schockabsorptionsmessung im Fersenbereich einer Schuhsohle und zum Vergleich einer linearen Zylinderfeder aus Metall

Da bei der passiven Dämpfung in Sohlen ein Teil der Bewegungsenergie in Wärme umgewandelt wird, stellt sich die Frage, ob diese Energie nicht anderweitig genutzt werden könnte. Eine Abschätzung der zu erwartenden Energiemenge einer 70 kg schweren Person beim Fersenauftritt und Zusammendrücken der Sohle um 5 mm liefert pro Schritt

$$W_{\text{schritt}} = m \cdot g \cdot h = 70 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 0,005 \text{ m} = 3,4 \text{ J}$$

Bei einer Schrittfrequenz von  $f = 1 \text{ Hz}$  (Gehen) ergibt sich eine Leistung von  $P = \frac{1}{2} f \cdot W_{\text{schritt}} = 1,7 \text{ W}$  pro Schuh. Einen wirklich guten Wirkungsgrad eines elektrischen Generators dieser Größenordnung vorausgesetzt, kann beim Gehen und aktiver Dämpfung im Fersenbereich bestenfalls eine elektrische Leistung von 1 Watt im Schuh erzeugt werden.

Zusammen mit dem HSG-IMIT (Institut für Mikro- und Informationstechnik der Hahn-Schickard-Gesellschaft e.V.) hat das PFI in einem Forschungsprojekt elektronische Komponenten zum Generieren und Speichern elektrischer Energie, die aus der Bewegung abgeleitet wird, entwickelt, so genannte Energy-Harvester, die ungenutzte Energie aus Systemen der Umwelt entnehmen und für sensorische Anwendungen nutzbar machen. In einem weiteren Projekt hat das PFI ein System entwickelt, bei dem während des Abrollens nach dem dynamoelektrischen Prinzip elektrischer Strom erzeugt wird, der dann über eine aktiv belüftete Sohle gesteuert zum Klimatisieren des Schuhinnenraums genutzt wird. Der praktische Nutzen dieser Generatoren liegt darin, dass beim Gehen elektrische Energie erzeugt werden kann, mit der Sensorische Anwendungen im Schuh dauerhaft, also ohne Austausch oder Nachladen von Batterien oder Akkus, möglich werden.

Hinsichtlich Sensorik im Schuh haben das PFI-Tochterinstitut ISC (International Shoe Competence Center) und PFI beispielsweise in einem AiF-Forschungsprojekt einen Sensorbasierten Schuh entwickelt, in dem ein Messsystem zur Ganganalyse und Trainingskontrolle vollständig integriert ist. Dieser

Schuh könnte die ambulante Rehabilitation von Verletzungen oder Erkrankungen, die sich auf den menschlichen Gang auswirken, unterstützen und bei der Therapiedokumentation sowie der Objektivierung der Therapie und deren Erfolge wertvolle Dienste leisten.

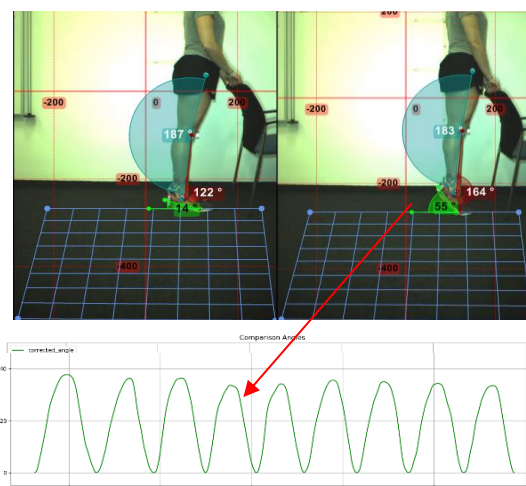


Abb. 8: Schuh mit Messsystem aus dem Forschungsprojekt „Sensorbasierter Rehaschuh“ von ISC und PFI

Alle Schutzfunktionen, die ein Schuh dem Fuß bietet, haben Auswirkungen auf Biomechanik und Gang des Trägers. Grob gesagt, je mehr Schutz und Abkopplung von der Umwelt, umso weiter entfernt sich der Gang vom Barfußlauf. Ein wichtiges, messbares Kriterium ist die Flexibilität bei Torsion und Biegung (Abrollen) des Schuhs, die maßgeblich von der Sohle beeinflusst werden. Über eine Prüfmaschine kann die Flexibilität von Schuhen und Sohlen quasistatisch und dynamisch erfasst werden. In einem Forschungsprojekt und in Studienarbeiten am PFI wurde dies untersucht. Ein interessantes Ergebnis war, dass die meisten Schuhe – wie zu erwarten – nach mehreren Belastungszyklen weniger steif waren und sich asymptotisch einem bleibenden Wert näherten, aber nach einer Erholungszeit und erneuter Prüfung wieder annähernd die Anfangssteifigkeiten annahmten.

Für verschiedene Tragesituationen wäre es vorteilhaft, wenn Sohlensteifigkeit und Dämpfung adaptiv angepasst werden könnten. Technische Möglichkeiten hierzu hat das PFI im Forschungsprojekt „Smarter Schuhkomfort – Entwicklung von smarten Innenbodenteilen zur situativen Komfortanpassung von Schuhen“ mit der Hochschule Kaiserslautern und dem ISC entwickelt.

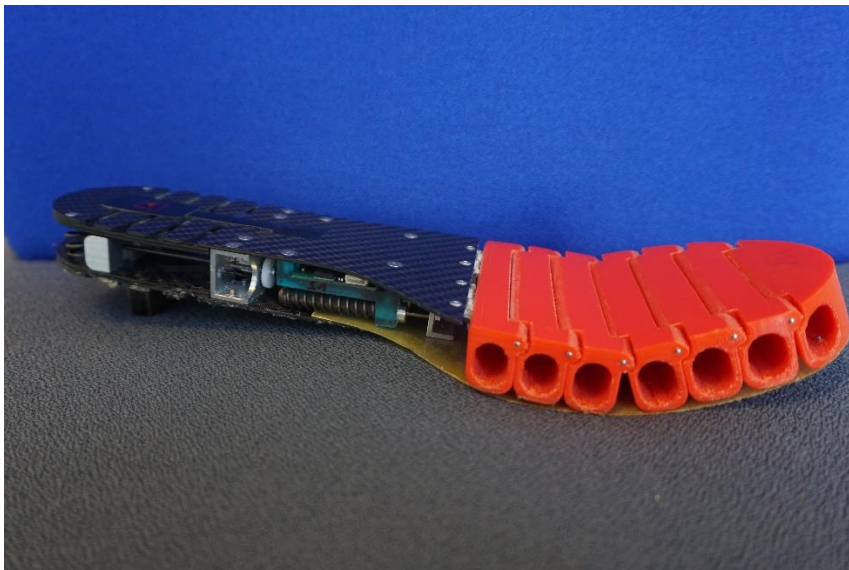


Abb. 9: Beispiel einer Sohle mit einstellbarer Steifigkeit. Aus dem AiF-Forschungsprojekt „Smarter Schuhkomfort“ von FH KL, ISC und PFI

Eine weitere Untersuchung an ISC und PFI befasste sich mit der Frage nach dem optimalen Querschnitt des Fußbetts im Metatarsal-Bereich von Sicherheitsschuhen. Aktuell weisen Schuhe dort einen nach unten konvexen Sohlenverlauf auf, was bedeutet, dass der dritte Metatarsal-Strahl tiefer liegt als der erste und der fünfte. Es wurde untersucht, ob ein flacher Querschnittsverlauf die biomechanischen Anforderungen im Schuh eventuell besser abbilden würde, und es wurden Lösungen dafür erarbeitet, wie dies ohne Nachteile für das Fußvolumen im Schuh umgesetzt werden kann.

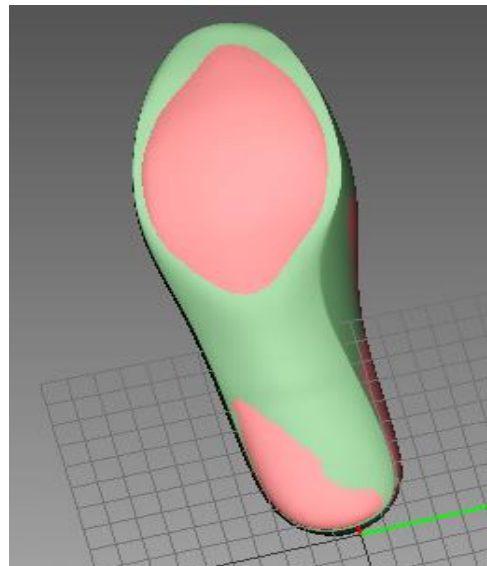
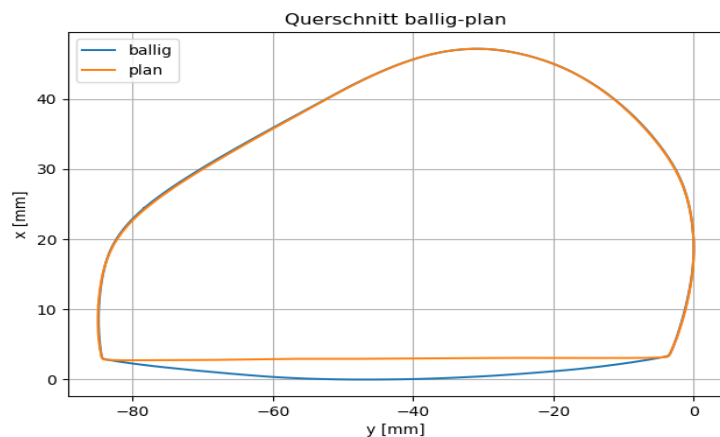


Abb. 10: Angepasste Vorfußgeometrie der Sohle eines innovativen Leistens. ISC-Forschungsprojekt

## Recycling

Eingangs wurde erwähnt, dass es Laufsohlen gibt, die zu Reparaturzwecken ausgetauscht werden können. Das ist leider für über 99 Prozent der in Umlauf befindlichen Schuhe nicht der Fall. Die Sohlenbefestigung am Schuh ist üblicherweise nicht reversibel ausgelegt. Wenn sich Sohlen ablösen lassen, so ist dies meist ein unerwünschter Effekt. Das Recycling von Schuhen wird in aktuellen Schuhkonstruktionen und Herstellungsverfahren nur sehr marginal berücksichtigt.

Für das PFI ist das Thema „Recycling von Schuhen“ stets auch Gegenstand der Forschung. Untersucht wurden beispielsweise die Möglichkeiten der Kompostierung von Schuhen oder die Verwendung nachwachsender Rohstoffe, insbesondere von Biopolymeren. Hierbei ist die Sohle als volumen- und massenmäßig meist dominierende Komponente eines Schuhs von besonderem Interesse. Da die Pflicht, Recyclingkonzepte vorzulegen in naher Zukunft auch die Schuhindustrie betreffen wird, bereitet das PFI hier aktuell ein Forschungsprojekt vor.

Fragen beantwortet gerne:

Dipl.-Ing. Peter Schultheis  
Abteilungsleitung Technische Entwicklung und Schuhtechnik  
Tel.: +49-(0)6331-249040  
E-Mail: [peter.schultheis@pfi-germany.de](mailto:peter.schultheis@pfi-germany.de)