

# Kurzzusammenfassung

Zu IGF-Vorhaben Nr. 18984 N

## **Thema**

CoolShoe – Geregelte aktiv-passive Belüftung auf Grundlage neuartiger, flexibler Generator-Aktor Technik

## **Projektlaufzeit**

01.01.2016 bis 31.12.2017

## **Forschungsvereinigung**

Prüf- und Forschungsinstitut Pirmasens e.V. (PFI)

## **Forschungseinrichtung(en)**

Prüf- und Forschungsinstitut Pirmasens e.V. (PFI)

Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V. (HS)

## **Danksagung**

Das IGF-Vorhaben 18984N der Forschungsvereinigung Prüf- und Forschungsinstitut Pirmasens e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

# 1 Kurzzusammenfassung

In dem AiF-Projekt „CoolShoe“ befasste sich das PFI mit der geregelten aktiven-passiven Belüftung von Schuhen mit Hilfe neuartiger, flexibler Generator-Aktor Technik. Ziel war es das Schuhklima messtechnisch zu erfassen und anhand dieser Sensorsignale mit neuartiger Aktor-Technik das Schuhklima aktiv zu beeinflussen. Der Projektpartner „Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V.“ befasste sich mit der Energieautarkität des Schuhs. Alle benötigten Komponenten sollten dabei in den Schuh integrierbar sein.

Sobald man das Haus verlässt, trägt man in der Regel über einen längeren Zeitraum Schuhe, um seine Füße vor Umwelteinflüssen zu schützen. Durch das lange Tragen und je nach Aktivität herrscht oft ein feuchtes und (stark) erwärmtes Klima an den Füßen, welches als unangenehm empfunden wird und die persönliche Leistungs- und Konzentrationsfähigkeit negativ beeinflusst. Zudem wird durch das schlechte Fußklima Fuß- und Nagelpilzerkrankungen, aber auch Erkältungen begünstigt. Diesem Zustand kann mit entsprechendem Schuhwerk entgegengewirkt werden. Daher galt es einen Schuh zu entwickeln, der das Schuhklima erfasst und aktiv regelt, je nach Situation und persönlichem Empfinden des Anwenders.

Zum Erreichen des Projekt-Ziels wurden diverse Teilkomponenten (Luftstromerzeuger, passive- und aktive Ventile, Sensoren und Elektronik) entwickelt, getestet und optimiert. Hierzu wurden moderne Rapid-Prototyping-Verfahren verwendet. Mittels des Luftstromerzeugers und passiven Ventilen wird aus der Laufbewegung ein gerichteter Luftstrom erzeugt. Dieser Luftstrom wird mit dem aktiven Ventil entweder in das Schuhinnere umgelenkt, sodass die Feuchte aus dem Schuh transportiert wird oder, falls Kühlung nicht aktiviert ist, aus dem Schuh geleitet, wodurch das Schuhklima nicht beeinflusst wird. Anhand der Messwerte der Materialfeuchte- und Temperatursensoren wird die Richtung des Luftstroms bestimmt. Durch Literaturrecherchen und den Erfahrungen des PFI wurden die Zonen des Tragekomforts festgelegt, welche als Regelungsbasis dienen. Je nach Anwender können die Zonen angepasst werden. Alle Teilkomponenten sind in der Sohle integrierbar, zusätzlich sollen Sensoren im Schaftmaterial integriert werden.

Die wesentlichen Teilkomponenten konnten so weit entwickelt werden, dass diese im Schuh voll funktionsfähig verwendet werden können. Die weitere Optimierung des in dem Projekt mit untersuchten Materialfeuchtesensor sollte in Richtung Miniaturisierung gehen. Es wurde ein Musterschuh nach dem Konzept gefertigt, mit dem der wirksame Feuchteaustausch aus dem Schuh nachgewiesen werden konnte.

## 2 Durchgeführt Arbeitsschritte (PFI)

### 2.1 AP1: Spezifikation und Analyse der Randbedingungen

Um eine Regelung des Schuhklimas in Bezug auf Wärme und Feuchtigkeit vorzunehmen, müssen die Grenzwerte für Temperatur und Feuchtigkeit für einen guten Tragekomfort bekannt sein. Obwohl der Tragekomfort ein subjektives Empfinden des jeweiligen Schuhträgers ist, kann mit Hilfe von Daten aus Trageversuchen mit verschiedenen Versuchspersonen eine qualitative und quantitative Einteilung des Tragekomforts erfolgen. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit vorgenommene Unterteilung ist in den folgenden Abschnitten beschrieben.

#### Temperatur

Die Temperatur im Schuhinnenraum spielt eine wichtige Rolle für das Wohlempfinden des Schuhträgers und variiert je nach Empfinden des Schuhträgers leicht. Bei einer Temperatur unter 27°C steigt das Kälteempfinden und der Tragekomfort sinkt. Im Weiteren droht eine Unterkühlung der Füße, was bei längeren Phasen zu einer Erkältung führen kann. Durch einen Temperaturanstieg auf über 35°C steigt die Schweißproduktion exponentiell an, wodurch der Tragekomfort negativ beeinflusst wird. Der optimale Bereich liegt zwischen 28°C und 33°C. Die Kombination aus Temperaturen (außerhalb des optimalen Bereichs) und hoher Feuchtigkeit beeinflusst den Tragekomfort maßgeblich.

#### Luftfeuchtigkeit

Der Abtransport des Schweißes erfolgt durch Verdunstung und Luftaustausch mit der Außenwelt über die Schaftkante, zwischen Fuß und Schuh. Da das im Schuh befindliche und bewegte Luftvolumen in getragenen Schuhen gering ist, stellt sich schnell eine hohe Luftfeuchtigkeit ein und der Schweißabtransport wird verringert. Eine Belüftung des Schuhinnenraumes ist nur dann effektiv, wenn die Zuluft eine geringere absolute Luftfeuchtigkeit als die Luft im Schuhinneren besitzt. Eine relative Luftfeuchtigkeit von  $rF = 70\%$  soll im Schuhinnenraum nicht überschritten werden.

#### Materialfeuchte

Eine Materialfeuchte  $F_g$  von 30% fühlt sich spürbar feucht an. Um einen ausreichend guten Tragekomfort zu gewährleisten und um rechtzeitig in das Schuhklima einzugreifen, müssen schon deutlich geringere Feuchtegehalte messbar sein. Bei einer Materialfeuchte über 20% wird davon ausgegangen, dass kein angenehmes Schuhklima herrscht.

Der Tragekomfort ist maßgeblich abhängig vom individuellen, subjektiven Empfinden des Schuhträgers. Die Einteilung ist grafisch in Abbildung 1 dargestellt.

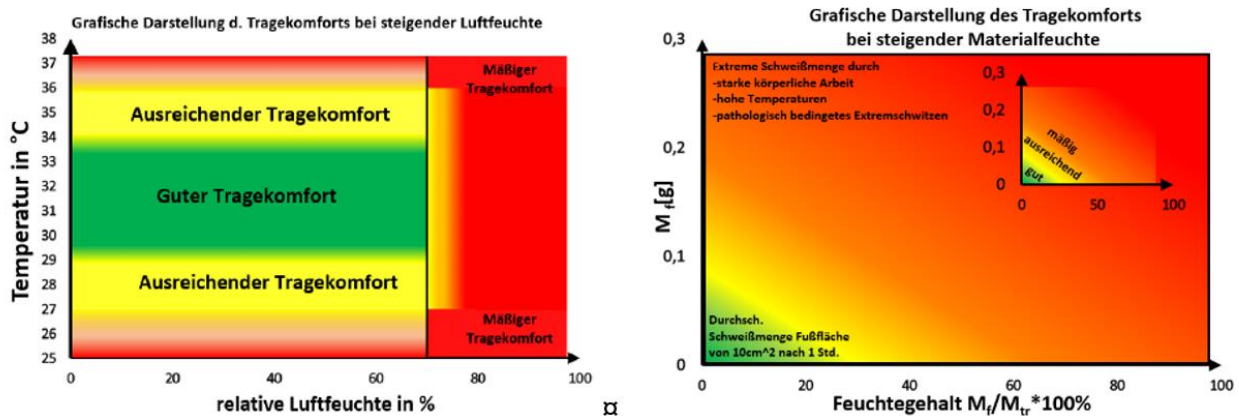


Abbildung 1: Tragekomfort in Abhängigkeit von Temperatur und Feuchte im Schuh.

## 2.2 AP2: Entwicklung angepasster Sensorik

Zu Beginn des Projektes gab es noch keine kommerziell erhältlichen Sensoren, die für die Messung der Feuchtigkeit im Schuh spezifiziert waren. Daher wurden im ersten Schritt kommerziell erhältliche Feuchtesensoren anderer Anwendungsfelder analysiert und Messprinzipien entwickelt, welche für den Schuhbereich verwendet werden können. Diese Sensoren wurden unter anderem mit vorselektierten Materialien aus dem Schuhbereich getestet. Da es kaum Materialien bzw. physikalische Effekte gibt, die nicht von der Anwesenheit von Feuchtigkeit beeinflusst werden, existieren zur Feuchtebestimmung, je nach Anwendungszweck, eine Vielzahl unterschiedlicher Sensorprinzipien (kapazitiv, resistiv, induktiv, Mikrowellen usw.). Die folgenden Anforderungen an die Sensorik für die Feuchtemessung im Schuh wurden festgelegt:

- Möglichst genaue und reproduktive Messung der Feuchtigkeit im Schuh
- Reproduzierbarkeit der Messergebnisse über einen längeren Zeitraum (Schuhlebensdauer)
- Mechanische Belastbarkeit
- Verzögerungsfreie Messwerterfassung
- Integrierbarkeit
- Unempfindlich gegenüber korrosiven Effekten

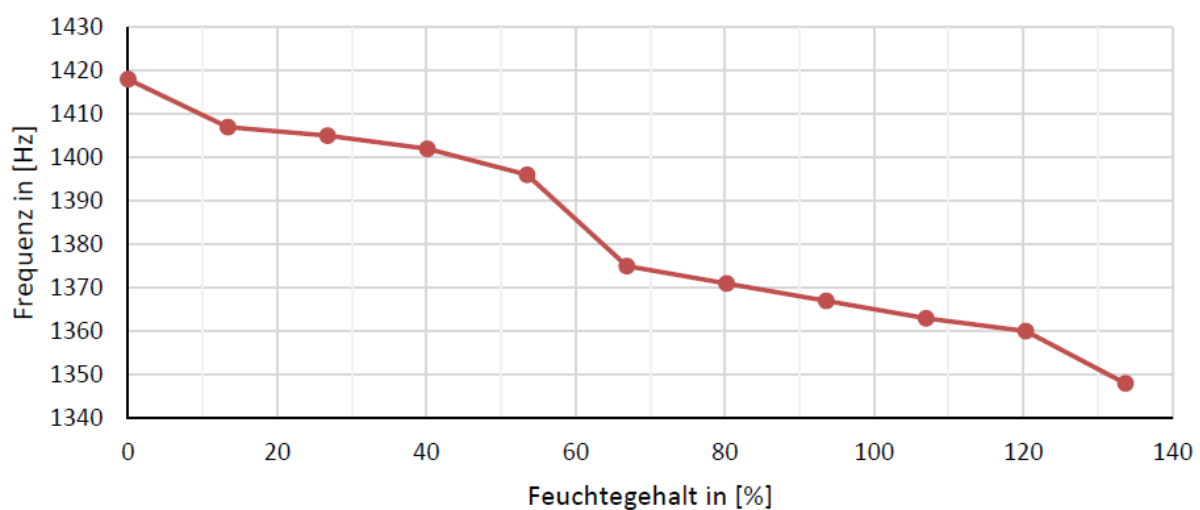
Im ersten Schritt wurden Sensoren an verschiedenen Positionen im Schuh integriert (Abbildung 2), eine definierte Feuchte eingebracht (angefeuchtete Socke auf Leisten) und die Messwerte betrachtet.



**Abbildung 2: Messpunkte Vorfuß, Ferse, Längsgewölbe.**

Für weitere Versuche wurden Schuhmaterialien auf den zu untersuchenden Sensor zugeschnitten, unterschiedliche Mengen Normschweiß aufgebracht, gleichmäßig verteilt und anschließend das Messsignal ausgewertet. Jedes der genutzten Messprinzipien besitzt spezifische Vor- und Nachteile, welche bei der Auswahl berücksichtigt werden müssen. Zum Beispiel hat eine drastische Miniaturisierung um den Faktor 10 eines gut messenden Sensors gezeigt, dass Materialfeuchten kleiner 20% nicht mehr eindeutig bestimmt werden konnten. In Abbildung 3 ist das Sensorsignal des nicht miniaturisierten Sensors dargestellt, mit dem auch geringe Feuchtegehalte gemessen werden konnten.

### Frequenz über Feuchtegehalt bei Filz



**Abbildung 3: Frequenz in Abhängigkeit der Materialfeuchte.**

Mit Hilfe eines deutlich komplexeren Sensors konnten auch geringe Materialfeuchten mit einer höheren Auflösung gemessen werden (siehe Abbildung 4). Dieser Sensor

besitzt den Nachteil, dass dieser anfälliger gegen externe Einflüsse (wie bspw. dem im aufliegenden Fußgewebe eingelagertens Wasser) ist.

### Imaginäranteil über Feuchtegehalt

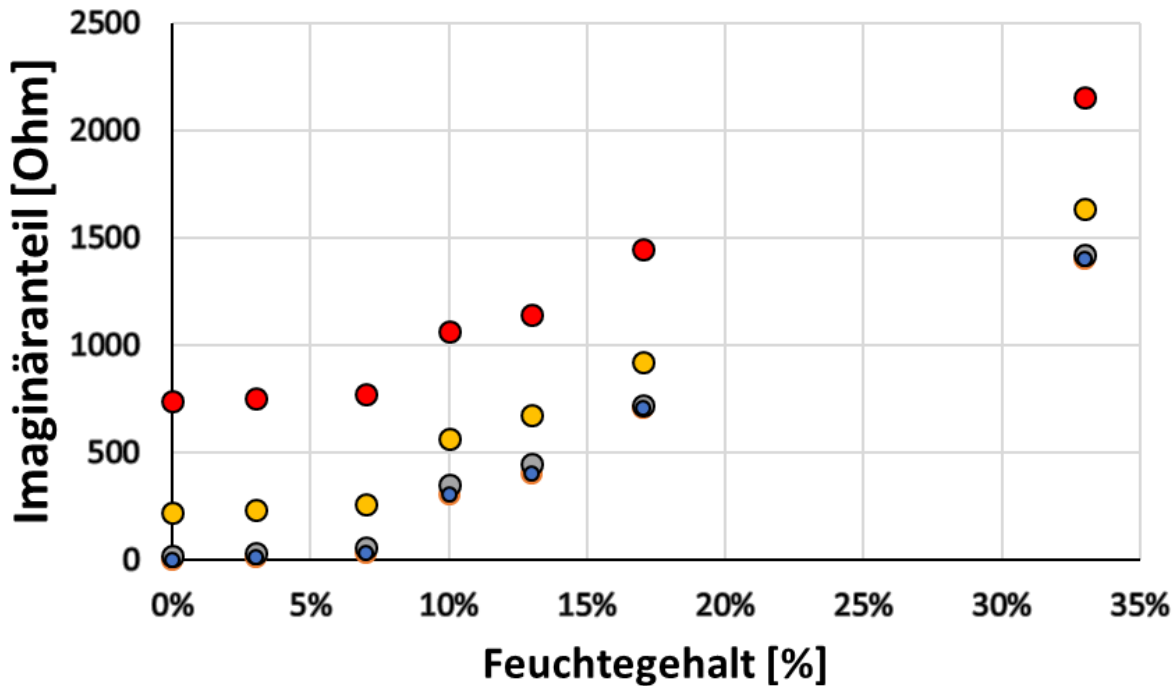


Abbildung 4: Imaginäranteil über Feuchtegehalt bei unterschiedlichen Frequenzen.

Weitere Details zu den untersuchten und entwickelten Sensoren können dem Schlussbericht entnommen werden.

## 2.3 AP3: Entwicklung der Aktorik und des Belüftungssystems

Die Belüftung des Schuhinnenraumes lässt sich in die zwei Bereiche *Luftstromerzeugung* und *Luftstromverteilung* unterteilen. Für die Luftstromerzeugung wurden mehrere Balgpumpen und passive Ventile entwickelt und getestet. Für die Luftstromverteilung wurden zwei aktiv steuerbare Ventile entworfen und passende Leitungen für die Zu- und Abluft ausgewählt. In der Entwicklungsphase wurden moderne Rapid-Prototyping-Verfahren angewendet, mit denen feste und flexible Strukturen erzeugt werden konnten.

### 2.3.1 Passive Ventile

Die frische Luft wird von außen durch die Balgpumpe angesaugt und an das aktive Ventil geleitet, sodass die Luft entweder in den Schuhinnenraum oder direkt wieder aus dem Schuh geführt wird. Hierzu werden passive Ventile benötigt, die den Luftstrom nur in eine Richtung zulassen, sodass die Pumpe nicht einen Teil der feuchten Luft des

Schuhinnenraumes wiederaufnimmt und zurück in den Schuh transportiert. Die Anforderungen an das passive Ventil sind:

- Möglichst kleine Bauform
- Belastungen im Schuh standhalten
- Druck der Balgpumpe standhalten

Da kein Hersteller oder Vertrieb solcher Ventile gefunden wurde, der insbesondere auch kleine Stückzahlen liefert, wurden die Ventile selbst in unterschiedlichen Ausführungen hergestellt und charakterisiert (Tabelle 1). Das optimale Ventil besitzt einen möglichst geringen Öffnungs- und Schließdruck bei gleichzeitig hohem und dichten Schließvermögen.

**Tabelle 1: Vergleich unterschiedlicher Passivventile.**

Ventilnummer	Öffnungsdruck [mbar]	Schließdruck [mbar]
1	18,45	329,46
2	4,89	144,7
3	19	462,15
4	35,44	> 500
5	22,3	383,29
6	14,69	> 500
7	11,89	> 500
8	17,34	292,4
9	29,35	> 500
10	12,63	> 500
11	1,93	98,2
12	10,98	75,32
13	4,67	87,61
14	0,74	115,59
15	7,7	141,73

### 2.3.2 Aktives Ventil

Da die Luftzufuhr in den Schuh zu- oder abschaltbar sein soll, wurde eine Lösung gesucht, den Luftstrom entweder in den Schuhinnenraum oder an die Umgebung zu leiten. Hierfür wurde ein aktives Ventil entwickelt. Die Schaltung der Luftwege erfolgt mit einem Aktor, welcher über die Elektronik angesteuert wird. Dieses wurde hinsichtlich maximal möglichen Durchfluss optimiert. Die benötigte Energie zum Umschalten zwischen den beiden Stellungen beträgt gerade einmal 471mWs. In der zweiten Version wurde eine Positionsrückmeldung integriert, sodass der aktuelle Schaltzustand bekannt ist. Durch den Aufbau ist das Ventil nicht korrosionsanfällig, sodass auch ein Betrieb mit feuchter Luft möglich ist.



### 2.3.3 Pumpen

Für die Erzeugung eines Luftstroms im Schuh soll eine Lösung für eine mögliche Balgpumpe gefunden werden, die einen Teil der auftretenden Bewegungsenergie in einen Luftstrom umwandelt. Für diesen speziellen Anwendungszweck konnten keine Balgpumpen käuflich erworben werden, weshalb die Balgpumpe selbst entworfen, gefertigt und charakterisiert werden musste. Diese soll im Mittelfuß- bzw. Vorfußbereich integriert werden können. Zum Komprimieren der Pumpe wird die bei der Aufsetz- und Abrollbewegung des Fußes entstehende Energie genutzt. Um zu vermeiden, dass sich die Abrollbewegung wie das Waten im Moor anfühlt, wurde der Hub limitiert. Bei der Pumpenkonstruktion wurden verschiedene Geometrien gewählt, die sich am Platzangebot im Schuh und der Größe des Ballenbereiches orientieren. Um die Leistungen unterschiedlicher Pumpenkonstruktionen vergleichen zu können und die Entscheidung für eine Pumpenkonstruktion für den späteren Einbau in den Schuh zu unterstützen, wurden diese an einer vom PFI entwickelten Dauerbelastungsprüfmaschine mit einem Volumen- und Drucksensor untersucht. Ein Ausschnitt aus dem Pumpenvergleich hinsichtlich erzeugtem Volumenstrom und Druck ist in der Abbildung 5 dargestellt.

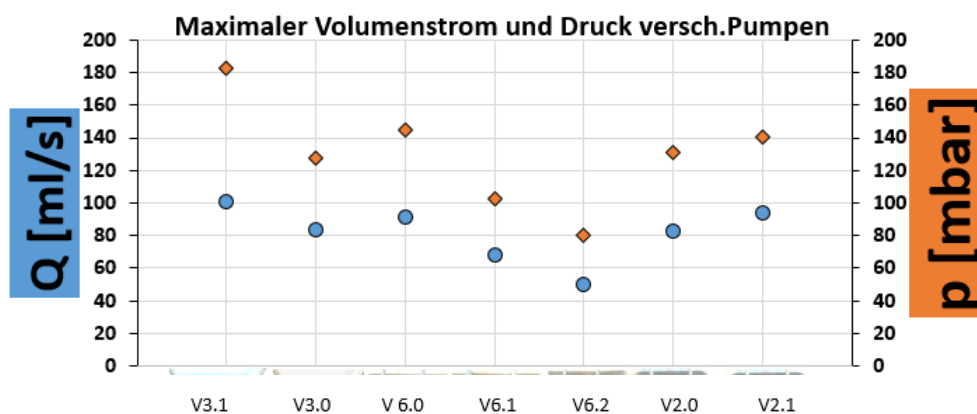


Abbildung 5: Pumpenvergleich hinsichtlich erzeugtem Volumenstrom und Druck.

### 2.3.4 Elektronik

Zum Verarbeiten der Sensorsignale und Steuern der Aktorik, wurde die in Abbildung 6 dargestellte Platine entwickelt. Für die ersten Tests wurden die Komponenten auf einem Entwicklungs-Steckbrett ausgiebig getestet. Anschließend wurde die Platine für den Fersenbereich gefertigt. Folgende Module befinden sich auf der Platine:

- Mikrocontroller
- Kommunikationseinheit
- Aktortreiber
- Ladeschaltung für den Energiespeicher
- Spannungswandler



- Diverse Schaltungen zur Ermittlung der Feuchtigkeit und Temperatur im Schuh
- Universelle Ein-/Ausgänge für Erweiterungen

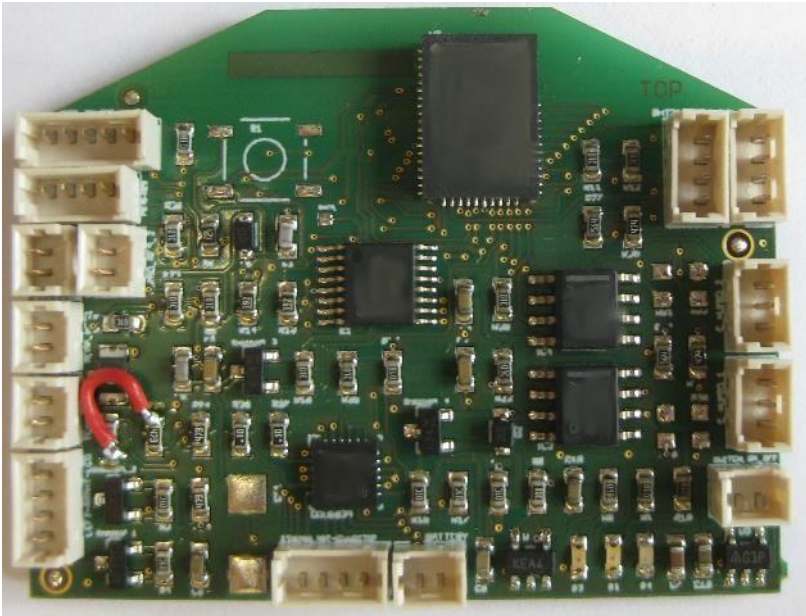


Abbildung 6: Platine.

## 2.4 AP4: Erstellung eines Komplettmusterschuhs

### 2.4.1 Einbaukonzept für Sensorik und Belüftung in den Schuh

Für den Einbau der Pumpe, den Zuleitungen und Sensoren wurde ein Einbaukonzept erstellt und dieses in einem Musterschuh umgesetzt. Hierzu werden die vom PFI erstellten Komponenten, als auch Schuhbaukomponenten aus einem Katalog verwendet. Um zu sehen, was „geht“, d.h. welche Volumenströme und Elektrizitätsmengen sich „ernten lassen“, wurde zunächst ein Schuh möglichst großem Bauraum für die aktiven Komponenten vorgesehen, weshalb Leisten, Schalensohlen und Stiefelschäfte in Schuhgröße 46 gewählt wurden. Die später erforderliche Miniaturisierung kann dann die bisher prototypischen Komponenten für kleinere Schuhgrößen herunterskalieren. Die vorgesehenen Positionen sind in der Abbildung 7 dargestellt.

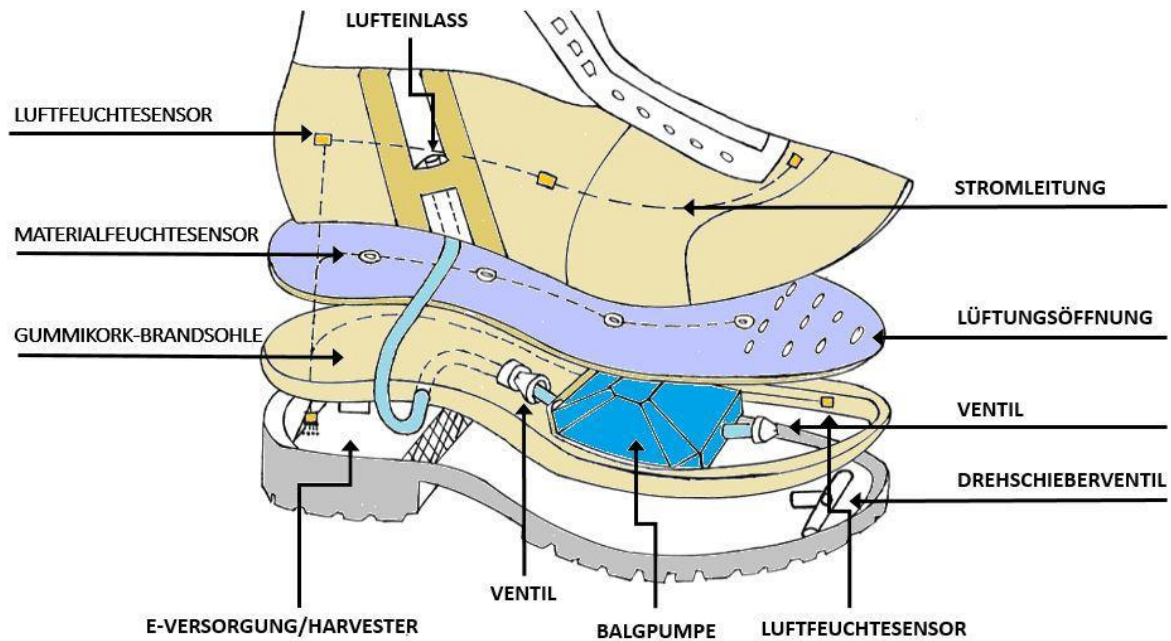


Abbildung 7: Einbaukonzept.

## 2.4.2 Umgesetzte Konzept

Der erste Musterschuh, mit dem auch die ersten Versuche durchgeführt wurden, ist in der Abbildung 8 dargestellt.



Abbildung 8: Musterschuh.

## **2.5 AP5: Messungen, Modellentwicklung und Validierung**

Dieses durchgeführte Arbeitspaket zur Bewertung und Entwicklung der einzelnen Funktionskomponenten ist in den jeweiligen Arbeitspaketen zu den Teilkomponenten aufgeführt. Der gesamte Schuh mit den integrierten Komponenten konnte nicht getestet werden, da aufgrund von Problemen mit dem miniaturisierten Materialfeuchtesensor nicht die volle geplante Funktionalität vorhanden war und ein Redesign erforderlich war.

## **2.6 AP6: Redesign und Vereinigung mit Energy Harvester**

Die Teilkomponenten wurden erst als Funktionsmuster aufgebaut und anschließend, wenn nötig neu designet, sodass diese in den Schuh integriert werden konnten. Bei der Konstruktion der Teilkomponenten wurde teils die Integrierbarkeit in den Schuh von Anfang an beachtet. Das Redesign ist in den jeweiligen Arbeitspaketen aufgeführt. Beide Teilsysteme (Belüftungssystem und Energy Harvesting System) konnten soweit möglich, erfolgreich entwickelt werden. Die Funktion konnte für beide Fälle nachgewiesen und demonstriert werden. Die Gesamtintegration beider Teilsysteme in einen Schuh stellte sich schwieriger dar, als ursprünglich angenommen. Eine besondere Herausforderung stellte dabei die Miniaturisierung beider Teilsysteme dar, welche im Rahmen des Projektes nicht vollständig umgesetzt wurde, sondern im Rahmen einer späteren Anpassung an Stückzahlen und Serienfertigung erfolgen soll. Um ein kompaktes und energieautarkes Gesamtsystem zu erzielen, sind noch weitere Entwicklungsschritte notwendig.

### 3 Zusammenfassung und Ausblick

Die Entwicklung des mit Sensoren und Aktoren bestückten „Klima“-Schuhs war sehr umfassend und wurde in mehrere Arbeitspakete zerlegt, welche sequentiell und zum Teil auch parallel bearbeitet wurden.

Auf Seiten der Schuhkomponenten zum Regeln des Schuhklimas wurden die notwendigen Teilkomponenten (aktive / passive Ventile, Luftstromerzeuger, Sensoren und Elektronik) entwickelt, getestet und optimiert. Mit Hilfe des Luftstromerzeugers wird aus der Gehbewegung ein Luftstrom erzeugt, welcher zuerst mit Hilfe von passiven Ventilen in nur eine Richtung zugelassen und anschließend mit dem aktiven Ventil an die entsprechenden Stellen geleitet wird. Als Regelungsgrundlage soll die Materialfeuchte und Temperatur gemessen werden. Hierzu wurden zuerst kommerzielle Luftfeuchte-Sensoren untersucht und anschließend eigene Sensoren entwickelt. Alle Teilkomponenten bis auf den Materialfeuchtesensor konnten so weit entwickelt werden, sodass diese in den Schuh integriert werden konnten. Die entwickelten miniaturisierten Sensoren liefern im interessanten Feuchtegehalt unter 10% noch keine stabile, aussagekräftige Werte, bei der die Regelung beginnen müsste. Daher besteht noch weiterer Forschungsbedarf. Ein Musterschuhkonzept wurde erstellt und gefertigt. Mit diesem wurden (Geh-) Versuche im passiven Betrieb (ohne Elektronik) durchgeführt.

Auf Seiten der Energieerzeugung mittels Energy Harvesting, wurde eine Auswahl von vier Konzepten bestimmt, welche die mechanische Energie des menschlichen Gangs in elektrische Energie umwandeln können. Von diesen vier Wandlungsmechanismen wurden zwei in kompakter Form als Laborversuche entwickelt und umgesetzt. Die verbleibenden und vielversprechenderen Prinzipien wurden detailliert entwickelt, gefertigt und unter realen Laufbedingungen charakterisiert, sodass fertige Funktionsmuster vorliegen.