

---

# **Additive Fertigungsverfahren für die kosteneffiziente Herstellung von Individualteilen in der Sportschuhindustrie**

Dr.-Ing. Uwe Klaeger, Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Magdeburg

5. Merseburger Rapid Prototyping Forum – i-manufacturing

Merseburg, 8.September 2011

- Motivation für das Projekt
- Zielstellung und Lösungsansatz
- Untersuchungen an Probekörpern
- Belastungstests an Musterleisten
- Integration eines Identsystems (RFID)
- Zusammenfassung und Ausblick

- Kundenindividuelle Massenfertigung gewinnt in der Schuhindustrie eine immer größere Bedeutung
- Zentrales Element bei der Schuhproduktion ist der Leisten - Zusammen mit der Laufsohle bestimmt er maßgeblich die Form des Schuhs
- Derzeitige Fertigungstechnologie ist kostenintensiv → Verlagerung in Billiglohnländer → Zuordnung/Rückverfolgbarkeit erschwert
- Der hohe internationale Wettbewerbsdruck zwingt auch die Schuhindustrie zu neuen Organisationskonzepten

### Vision:

Verbesserung des Kostenmanagements für die Herstellung von Individualleisten durch werkzeuglose Fertigung mittels Schicht-Laminat-Verfahren

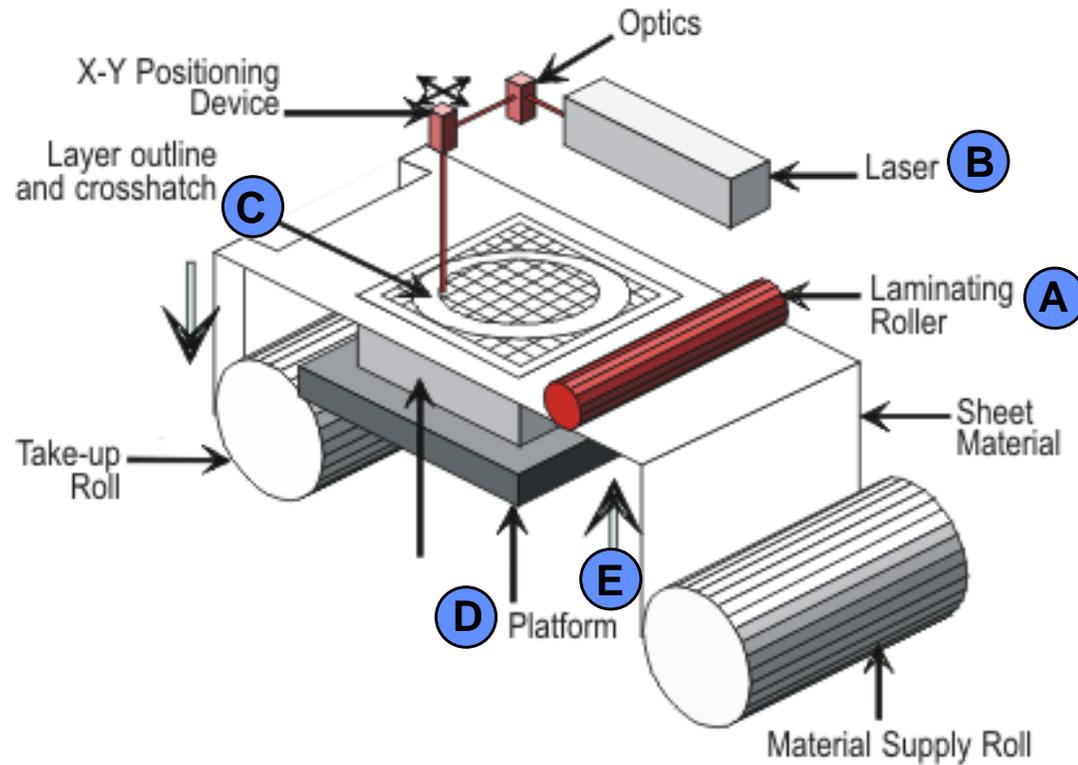
### Zielstellung des Projektes

Realisierung einer alternativen Fertigungstechnologie zur kostengünstigeren Herstellung von Individual- und Serienleisten in der Sportschuhindustrie (Werkzeuglose Fertigung)

### Problemstellung

- Minimierung der Anzahl von Prozessschritten in der Leistenfertigung
- Erfüllung des geforderten Belastungsprofils (mechanische, thermische, chemische Eigenschaften) → z. B. Temperaturbeständigkeit bis 120 °C)
- Einhaltung hoher Fertigungstoleranzen zur Erzielung der geforderten Passgenauigkeit der einzelnen Leistenkomponenten
- Konstruktionsmethodik für die Integration von Identifikationssystemen in schichtweise gefertigte Leisten

Prozess-Prinzip

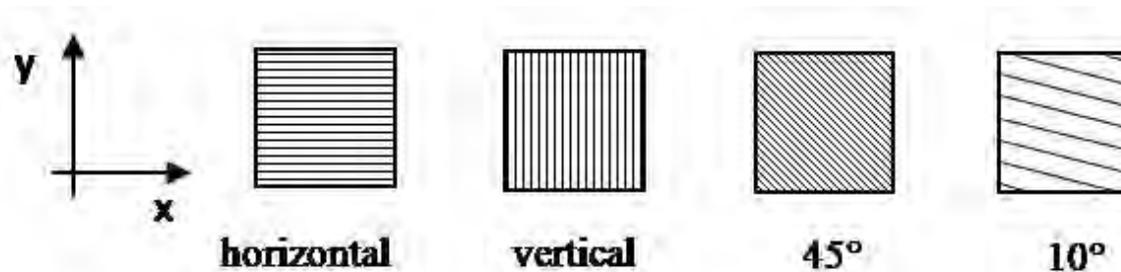


## Charakteristik von Schicht-Laminat- Bauteilen

<b>Eigenschaften</b>	<b>Vorteile LLM/LOM</b>	<b>Nachteile LLM/LOM</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Bauteile mit holzartiger Struktur und entsprechendem Eigenschaftsprofil</li><li>• Abmessungen von 800x 600x 600 mm<sup>3</sup> möglich</li><li>• Kostengünstige Herstellung der Modelle (Preisbasis: EUR je cm<sup>3</sup>)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• schneller Baufortschritt bei großvolumigen Bauteilen (hohe Baurate je Stunde)</li><li>• keine zusätzliche Stützgeometrie erforderlich</li><li>• Geringer Aufwand für prozessbedingte Nacharbeit</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Anisotropes Eigenschaftsprofil des Modells (Kennwerte sind abhängig von der Schichtlage während des Bauprozesses)</li><li>• Nachträgliche Infiltration oder Lackierung erforderlich (Vermeidung von Delamination aufgrund Feuchtigkeitseinfluss)</li></ul>

## Definition der Probengeometrie und des Versuchsplanes

- Anisotropie: Materialkennwerte in Schichtrichtung anders als senkrecht dazu
- Bauteillage hat entscheidende Bedeutung → Untersuchungen an Proben mit Ausrichtung der Bauteilgeometrie in waagerechter, senkrechter sowie im 45°- und 10°- Winkel zum Schichtaufbau
- Die für die Versuche ausgewählten Schichtbaulagen orientierten sich an den Hauptbelastungsrichtungen der Leisten während ihres Einsatzes



## Ermittlung der Hauptkenngrößen (1)

Test	Mechanische Eigenschaft
Tensile Test	Zugfestigkeit
Compressive Test	Druckfestigkeit
Bending test	Biegefestigkeit
Shore Hardness	Oberflächenhärte

- Durchführung von Vorversuchen an Probekörpern mit normgerechten Abmessungen gemäß EN ISO
- Zur statistischen Absicherung wurden für jede der durchgeführten Versuchsreihen zehn Proben hergestellt
- Proben mit einer Schichtbaulage von  $45^\circ$  lieferten die geringsten Werte (Probenbruch teilweise schon deutlich vor Erreichen der zulässigen Grenzwerte)
- Im Vergleich mit den Belastungen in der Produktion nur Werte von 20-25%  
→ Fertigungsprinzip wurde für weitere Versuche ausgeschlossen



## Ermittlung der Hauptkenngrößen (2)

Maßhaltigkeit der untersuchten Proben (Sollmaß 15 x 15 x 15 mm <sup>3</sup> )			
Schicht/Laminat-Orientierung	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
Vertikal	14.8	14.8	15.1
Vertikal infiltriert	14.6 (15.0)	14.8 (15.0)	15.4 (15.5)
Horizontal	14.9	14.9	15.5
Horizontal infiltriert	15.3 (15.4)	15.0 (15.2)	15.1 (15.3)
10°	14.8	14.9	15.3
10° - infiltriert	15.2 (15.4)	14.8 (15.1)	15.2 (15.5)

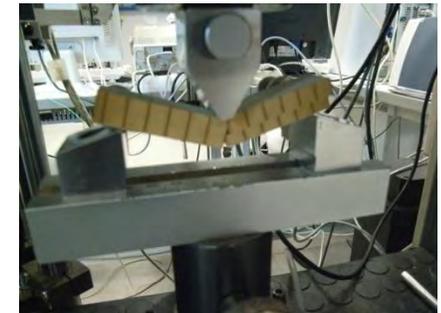
- Weitere Versuche: Ermittlung des Einflusses einer Infiltration auf die Werkstoffkennwerte → Behandlung der Proben mit 2K-Epoxidharzes und Auslagerung (Aushärtung) in einer Vakuumkammer 24 Stunden bei 80°C
- Infiltration der Bauteile bewirkt leichte Erhöhung der Bauteilabmessungen (in Klammern: Probenmaße nach der Infiltration) → Beachtung eines Skalierungsfaktors für den Bauprozess !
- Vermessung zeigt: Fertigungsgenauigkeit des Verfahrens liegt im Toleranzbereich

## Ermittlung der Hauptkenngrößen (3)

Parameter	Schichtorientierung der Proben						Referenzwert
	SR	WR	10°	SR i	WR i	10° i	
Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	40,0	25,5	25,4	45,7	33,8	35,3	30
Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	85,0	47,8	52,3	95,9	58,8	62,1	60
Biegefestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	53,4	21,7	22,4	52,2	26,3	33,4	30
Schlagzähigkeit [kJ/mm <sup>2</sup> ]	9,8	18,0	12,5	11,7	7,4	9,4	10
Shore Härte (A)	60-72	61-75	71-80	66-74	62-78	74-81	60

**SR**- Vertikal; **WR**- Horizontal; **10°**- Laminiert mit Faserrichtung im 10°-Winkel;  
**i**- Infiltrated

→ Statistische Absicherung durch eine Probenanzahl von 10 je Versuch



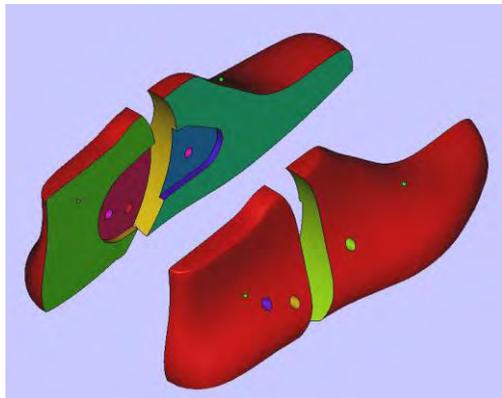
### Ergebnisbewertung

- Wie erwartet: Deutlicher Einfluss der Schicht-Baulage auf die Materialeigenschaften
- Die besten mechanischen Kennwerte werden erreicht, wenn die Schichten in einem 90°-Winkel zur Druckrichtung aufgebaut werden
- Akzeptable Werte für Schichtlagen bis zu einem Winkel von 10°
- Weitere Erhöhung der Kennwerte um ca. 20 % und der Biegefestigkeit um ca. 10 % durch Infiltration der Proben (2K-Epoxidharz , 24 Stunden im Wärmeofen bei 80°C)
- Behinderung des Eindringens des Infiltrats im Wesentlichen durch den gelösten Klebstoff in den laminierten Schichten

## Belastungsuntersuchungen an LLM-Leisten (1)

- Herstellung von jeweils 10 Proben nach Original-Leistengeometrie der Schuhhersteller
- Ermittlung der mechanischen Kennwerte an unbehandelten und infiltrierten Leisten
- Durchführung von Dauerstandversuchen unter Produktionsbedingungen

Ausgangspunkt sind digitalisierte CAD-Daten



Umwandlung in STL-Daten und Schichtaufbau

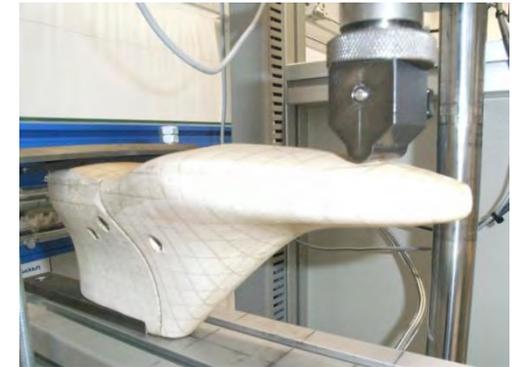


Komplettierung des Leistens mit Klappmechanismus

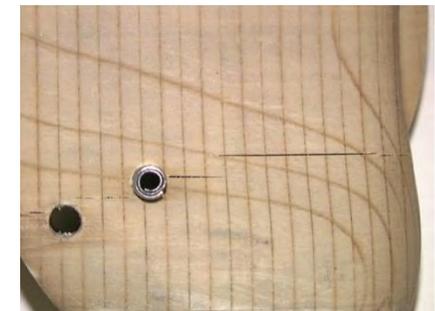


## Belastungsuntersuchungen an LLM-Leisten (2)

- Ausgehend von den Vorversuchen Herstellung der Proben so, dass Kraftereinleitung senkrecht (90°) und unter einem Winkel von 10° erfolgt
- Einspannung an der Ferse und Belastung der Fußspitze mit 400 N  
→ Dauerversuch mit 100.000 Lastwechseln
- Ermittlung der fünf wichtigsten mechanischen Kennwerte entsprechend der Einsatzbedingungen in der Produktion



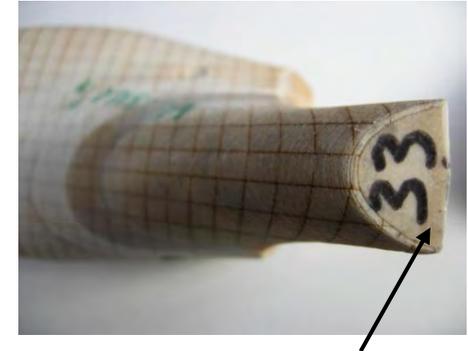
Parameter	SR	SR i	10°	10° i	Reference Value
Compressive Yield Point [N/mm <sup>2</sup> ]	40	42	25,5	32,2	30
Permanent Deformation [%]	0,82	0,84	0,64	0,68	1
Flexural Yield Strength [N/mm <sup>2</sup> ]	51,8	56,5	25,8	34,1	30
Impact Strength [kJ/mm <sup>2</sup> ]	9,6	10,2	10,4	12,5	10
Shore Hardness (A)	60-71	75-81	62-77	69-79	60



Probenversagen (Delamination)  
infolge Materialermüdung

### Ergebnisbewertung

- Festgelegte Kennwerte für die LLM-Leisten wurden für beide Schichtlagen (90°/10°) in den Versuchen erreicht
- Kurzzeitige Temperaturbelastung des Leistens von 120°C in der Produktion unkritisch
- Verschlechterung der Kennwerte bei dauerhafter Einsatztemperatur von > 80°C
- Keine vollständige Infiltration der Leisten nach 24 Stunden im Autoklaven bei 80°C
- Standzeit der LLM-Leisten im Gegensatz zur konventionellen Lösung um 20% geringer



Eindringtiefe des Infiltrats ca. 8 mm



Gebrochener Leisten nach 10 Produktionsdurchläufen

### Integration eines Identifizierungssystems - Zielkriterien

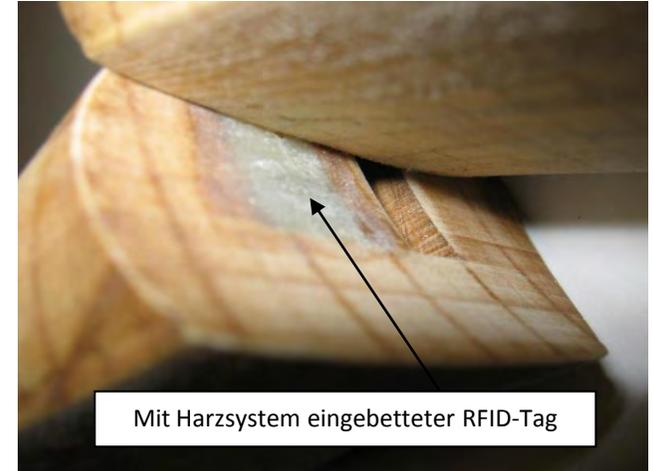
- Durchgängige Identifizierung der Leisten entlang der gesamten Prozesskette –  
Untersuchte technische Kriterien:
- Ort und Art der Befestigung des RFID-Tags (Einfluss des Untergrundes auf die Lese- bzw. Schreibentfernung der Transponder)
- Resistenz gegen Umwelteinflüsse (insbesondere Temperaturbereiche)
- Mögliche Abmessungen des RFID-Tags (Zusammenhang zwischen Baugröße des Transponders und der zu realisierenden Lese- bzw. Schreibentfernung)
- Kosten für den Transponder (Bauweise, notwendige Leistungsmerkmale)

#### Ergebnis:

- Verwendung von hochfrequenten Transpondern
- Einsatz von passiven Transpondern ohne eigene Energiequelle

### Integration eines Identifizierungssystems - Konstruktive Umsetzung

- Untersuchungen zur optimalen Größe und Position für die Transponder-Integration → möglichst geringer Fertigungsaufwand
- Ermittlung des optimalen Randabstandes für die Integration in der Polymer-Deckschicht für sicheren Lese-/Schreibzyklus
- Ermittlung des Temperatureinflusses auf die Funktion des Transponders → kein Funktionsverlust bei vorhandenen Prozesstemperaturen bis 120°C
- Wirtschaftlichkeitsbetrachtung → Geringe Zusatzkosten für Transponder und → Geringe Fehleranfälligkeit innerhalb des Produktionsprozesses



### Bisherige Untersuchungen haben gezeigt:

- Grundsätzliche Eignung des Schicht-Laminat-Verfahrens für die kundenindividuelle Leistenfertigung (90 % der Leisten haben Belastungen in der Produktion standgehalten)
- Ursache des Versagens der restlichen 10 %:
  - A) Unvollständige Infiltration der Bauteile in kritischen Bereichen (Hinterschneidungen)
  - B) Delamination der Bauteilgeometrie durch Materialversagen an den höchstbelasteten Stellen
- Infiltration erhöht mechanische Eigenschaften und verlängert die Standzeit
- Nachweis der Eignung von Identifikationssystemen zur Verbesserung von Informationsfluss und Logistik in der Schuhindustrie erbracht



### Weiterführende Arbeiten:

- Erhöhung der Standzeit der Leisten (Größere Anzahl von Produktionsdurchläufen)
- Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit der LLM-Technologie durch Optimierung der Gesamtanlage (Zuführ-, Laminier- und Schneidsystem)

---

# Danke für Ihre Aufmerksamkeit !