
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 Identensystems (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

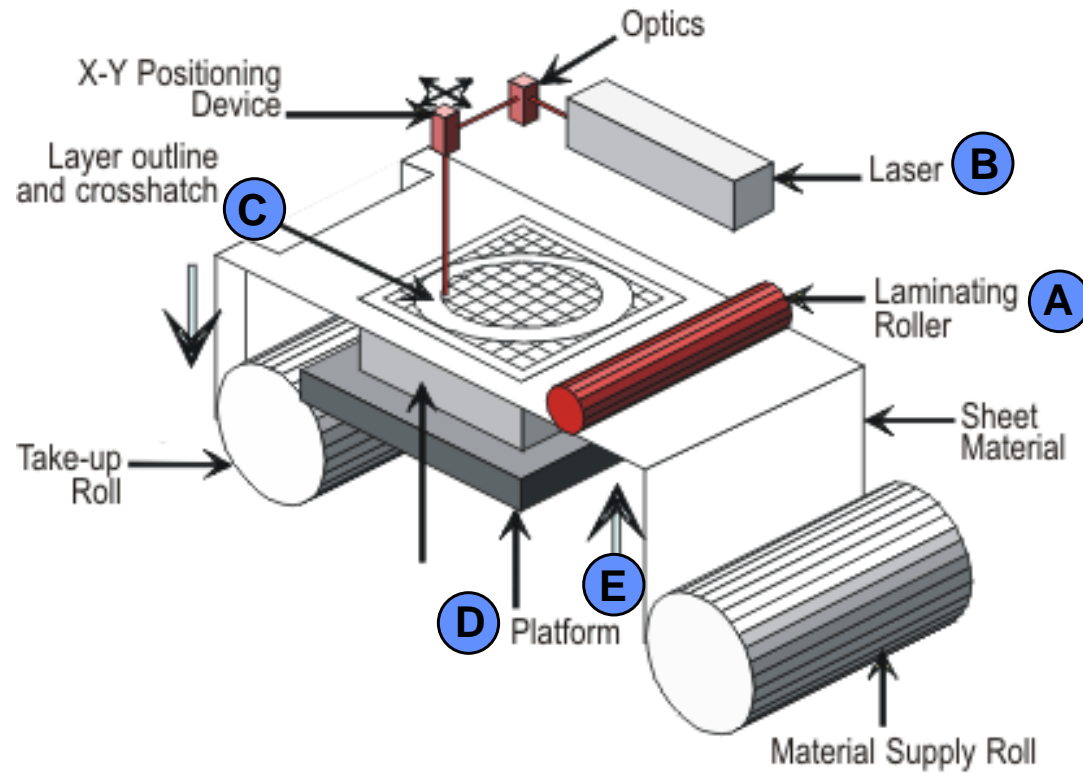
Zielstellung des Projektes

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

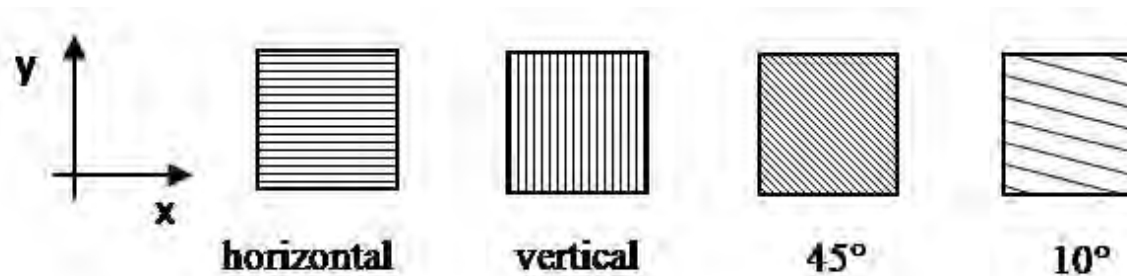


Charakteristik von Schicht-Laminat- Bauteilen

Eigenschaften	Vorteile LLM/LOM	Nachteile LLM/LOM
<ul style="list-style-type: none">• Bauteile mit holzartiger Struktur und entsprechendem Eigenschaftsprofil• Abmessungen von 800x 600x 600 mm³ möglich• Kostengünstige Herstellung der Modelle (Preisbasis: EUR je cm³)	<ul style="list-style-type: none">• schneller Baufortschritt bei großvolumigen Bauteilen (hohe Baurate je Stunde)• keine zusätzliche Stützgeometrie erforderlich• Geringer Aufwand für prozessbedingte Nacharbeit	<ul style="list-style-type: none">• Anisotropes Eigenschaftsprofil des Modells (Kennwerte sind abhängig von der Schichtlage während des Bauprozesses)• Nachträgliche Infiltration oder Lackierung erforderlich (Vermeidung von Delamination aufgrund Feuchtigkeitseinfluss)

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 Hauptkenngößen (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° 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 ³)			
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)

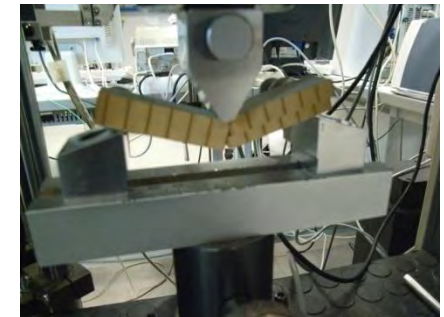
- Weitere Versuche: Ermittlung des Einflusses einer Infiltration auf die Werkstoffkennwerte → Behandlung der Proben mit 2K-Epoxidharzes und Auslagerung (Aushärtung) in einer Vakuumkammer 24 Stunden bei 80°C
- Infiltration der Bauteile bewirkt leichte Erhöhung der Bauteilabmessungen (in Klammern: Probenmaße 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 ²]	40,0	25,5	25,4	45,7	33,8	35,3	30
Zugfestigkeit [N/mm ²]	85,0	47,8	52,3	95,9	58,8	62,1	60
Biegefestigkeit [N/mm ²]	53,4	21,7	22,4	52,2	26,3	33,4	30
Schlagzähigkeit [kJ/mm ²]	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



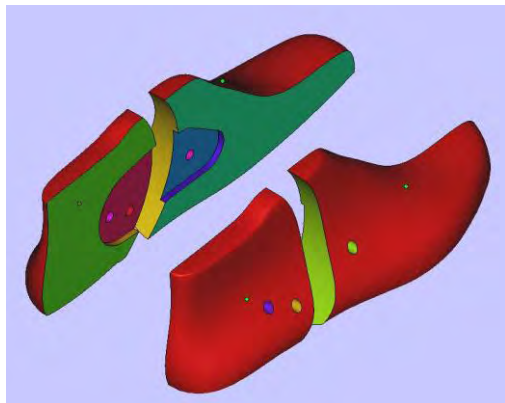
Ergebnisbewertung

- 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

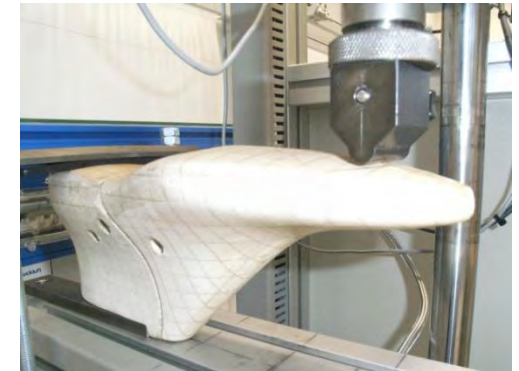


Komplettierung des Leistens mit Klappmechanismus

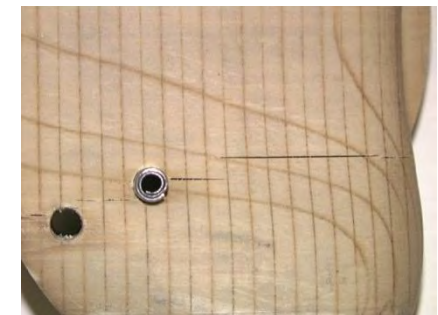


Belastungsuntersuchungen an LLM-Leisten (2)

- 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 ²]	40	42	25,5	32,2	30
Permanent Deformation [%]	0,82	0,84	0,64	0,68	1
Flexural Yield Strength [N/mm ²]	51,8	56,5	25,8	34,1	30
Impact Strength [kJ/mm ²]	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

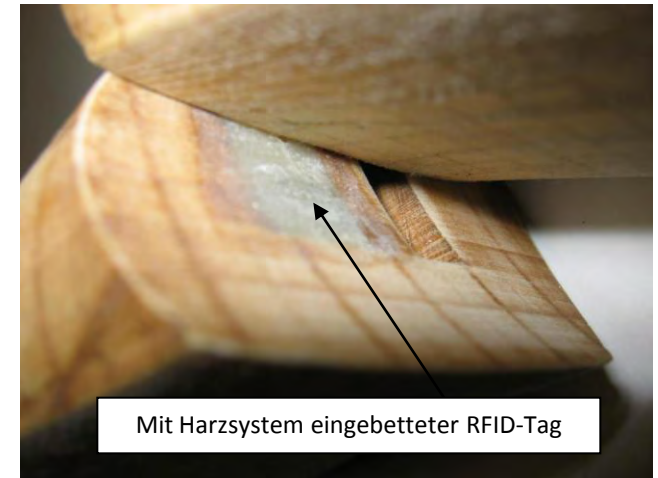
- Durchgängige Identifizierung der Leisten entlang der gesamten Prozesskette –
Untersuchte technische Kriterien:
- Ort und Art der Befestigung des RFID-Tags (Einfluss des Untergrundes auf die Lese- bzw. Schreibentfernung der Transponder)
- Resistenz gegen Umwelteinflüsse (insbesondere Temperaturbereiche)
- 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 !