

# Packaging-Technologien für textile Substrate

Ivo Locher, ETH Zürich – Wearable Computing Lab, Zürich, Schweiz  
Dr. Tünde Kirstein, ETH Zürich – Wearable Computing Lab, Zürich, Schweiz  
Prof. Gerhard Tröster, ETH Zürich – Wearable Computing Lab, Zürich, Schweiz  
{ ilocher, kirstein, troester }@ife.ee.ethz.ch, <http://www.wearable.ethz.ch>

## Kurzfassung

Die Entwicklung einer Aufbautechnologie für elektronische Schaltungen in Textilien ermöglicht die Integration von Elektronik in Bekleidung bei gleichbleibendem Tragekomfort. Unsere entwickelte Technologie verwendet ein Gewebe aus Polyesterfäden, die jeweils mit feinen Kupferdrähten verzwirrt sind. Jeder Kupferdraht selbst ist mit einem chemisch resistenten Lack überzogen. Damit elektrische Verbindungen zwischen den Kupferdrähten hergestellt werden können, müssen sowohl der Polyesterfaden als auch die Lackisolation entfernt werden. Im entstandenen Freiraum liegen die Kupferdrähte offen und können mit leitendem Kleber elektrisch verbunden werden. An anderen Stellen wiederum ist es schaltungstechnisch notwendig, Kupferdrähte zu unterbrechen, damit Kurzschlüsse vermieden werden.

Es werden Technologie und Methode beschrieben, wie elektronische Schaltungen auf textilen Substraten realisiert werden können (SoT: System on Textile).

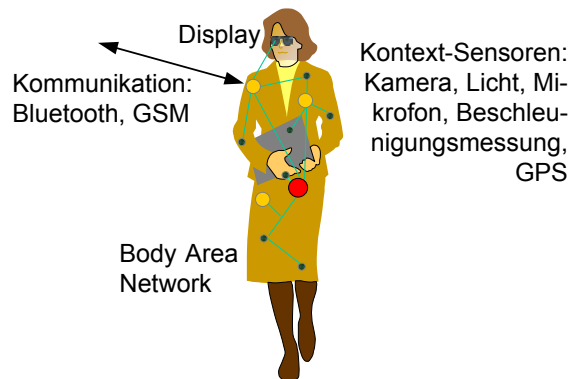
## 1 Einführung

Bei der Umsetzung unserer Vision von *Wearable Computing* konzentrieren wir uns in diesem Beitrag auf den Aspekt des Packagings und wie wir aus bestehenden Elektronik-Komponenten Systeme in Textilien (*SoT: System on Textile*) integrieren können. Ein Wearable Computing System beinhaltet, wie aus Bild 1 ersichtlich, verschiedene Sensoren, Ausgabemedien wie Displays, Elemente zur Kommunikation mit der Umgebung und ein textil-integriertes *Body Area Network* (BAN). Der Hauptteil dieses Beitrags befaßt sich mit der Herstellungsmethode eines solchen BANs und dessen Verbindung zu elektronischen Bauteilen, wie SMD- oder BGA-Chips.

Ausführliche Messungen an leitenden Textilien [1] haben gezeigt, daß Internet-Geschwindigkeit (100Mbps/s) innerhalb des Textils möglich ist.

Es existieren Ansätze zur Integration von kompletten Systemen in Bekleidung, wie zum Beispiel dem „WearARM“ [2], aber die Elektronik ist auf starren oder flexiblen Leiterplatten aufgebaut. Diese konventionelle Aufbautechnik schränkt den Tragekomfort und damit die Integrierbarkeit in unsere tägliche Kleidung ein. Einen Schritt weiter Richtung textiler Integration geht das „Wearable Motherboard“ [3].

Wir sehen die ersten Anwendungen unserer Technologie in der Präventionsmedizin und Rehabilitation. Kleider mit der nötigen Intelligenz ausgerüstet (*Smart Textiles*) können den Gesundheitszustand des Patienten ständig überwachen bzw. bei Rehabilitation Hinweise zu korrekter Haltung oder zur korrekten Durchführung einer Therapie geben. Andere Anwendungen liegen in der Funktion als *Personal Assistant* oder als Touristenführer in fremden Städten.



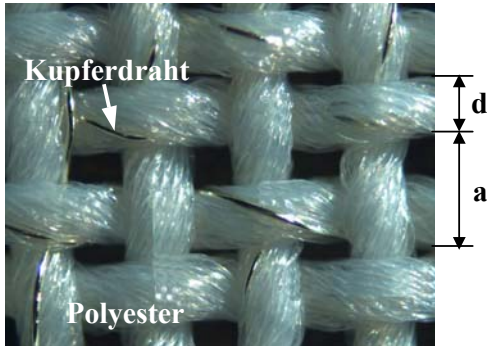
**Bild 1: Wearable Computing System**

Erst Packaging-Technologien für Textilien ermöglichen eine Integration solcher Funktionen in Kleider, ohne deren Tragekomfort zu schmälern.

## 2 Leitendes Textil

Für unsere Versuche verwendeten wir ein Gewebe mit integrierten, isolierten Kupferdrähten (siehe Bild 2).

Das Gewebe besteht aus Polyester Multifilament-Garn mit verzwirrttem, isoliertem Kupferdraht. Die Fadenabstände in x- und y-Richtung (Kett- und Schußrichtung) betragen im Schnitt 450µm und der Kupferdraht mit Isolation besitzt einen Durchmesser von 56µm. Die Wahl dieser Dimensionen ist ein Kompromiß zwischen Kupferdrahtdichte und Erhalt der textil-typischen Eigenschaften.



**Bild 2. Leitendes Gewebe (Variante a)**

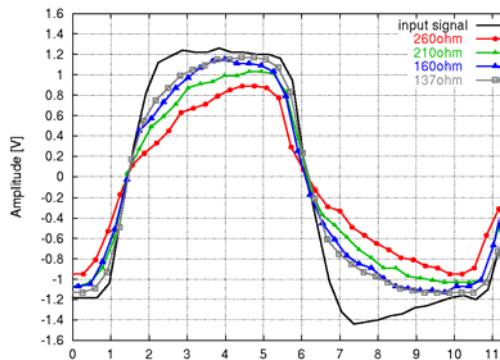
Durch die gegenseitige Isolation der Drähte wird eine Zweilageng-Struktur zur Verfügung gestellt, da kreuzende Drähte keine elektrische Verbindung eingehen. Dieser Typ von Kupferdraht war ursprünglich von der Firma Elektro-Feindraht AG Schweiz für Kleider zur Abschirmung von elektromagnetischen Feldern entwickelt worden. Aus diesem Grund wurde die Lackisolation speziell robust gegen Waschvorgänge ausgelegt.

### 3 Elektrische Eigenschaften des Kupferdrahts

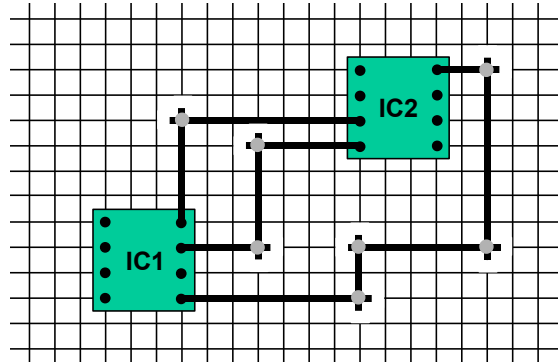
In einem ersten Schritt wurden die elektrischen Eigenschaften der leitenden Drähte im Textil aus Bild 2 spezifiziert [1]. Die Resultate zeigten, daß diese Art von leitendem Gewebe sich zur Signalführung eignet. Die Strukturen im Textil sind jedoch ungenauer gegenüber Strukturen auf Leiterplatten. Die Garndicke  $d$  und der Fadenabstand  $a$  variieren im Prozentbereich wie aus Tabelle 1 ersichtlich ist.

**Tabelle 1: Textil-Toleranzen**

	Dimension	Standardabweichung $\sigma$
Garndicke $d$	334 $\mu\text{m}$	28 $\mu\text{m}$ , 8.4%
Fadenabstand $a$	450 $\mu\text{m}$	24 $\mu\text{m}$ , 5.3%



**Bild 3: Datenrate über eine textile Leitung**



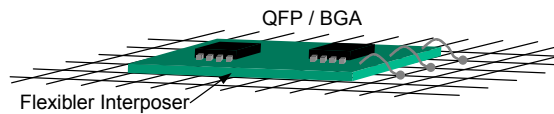
**Bild 4: Verbindungsstruktur auf Textil**

Mit diesen Dimensionen wird eine Dichte von ungefähr 20 Fäden pro Zentimeter erreicht. Die Leitungsimpedanz läßt auf Werte im Bereich zwischen  $100\Omega$  und  $250\Omega$  einstellen. Aus geometrischen Gründen ist eine  $50\Omega$ -Impedanz nicht möglich. Auf kurze Distanzen werden Bandbreiten von mehreren 100 MHz erreicht. Bild 3 zeigt ein 100 MHz-Signal, das über eine 20cm lange textile Leitung gesendet wurde für verschiedene Leitungsimpedanz-Konfigurationen.

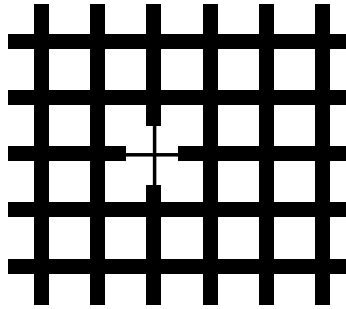
Der Durchmesser des Kupferdrahts von  $40\mu\text{m}$  (+  $14\mu\text{m}$  Lackisolation) hat eine erhebliche Dämpfung zur Folge. Zusätzlich ist der Draht mit dem Garn verzwirnt, was zu einer um etwa 25% größeren Drahtlänge gegenüber der Textillänge führt. Somit beträgt der DC-Widerstand eines Kupferdrahts im Garn  $18\Omega$  pro Meter Stoff, jedoch läßt sich dieser Wert durch Parallelschaltung von mehreren Drähten verkleinern, so daß auch niederohmige Versorgungsleitungen realisiert werden können.

### 4 Verbindungstechnologie

Während bei konventionellen Leiterplatten Leiterbahnen in beliebiger Richtung und mit beliebigen Richtungswechseln auf mehreren Lagen entworfen werden können, findet man im Textil eine andere Ausgangslage vor. Hier sind die Leiterbahnen in Form der Kupferdrähte in einer Matrix-Anordnung bereits vorhanden. Das Gitternetz in Bild 4 stellt die Kupferdrähte des Textils aus Bild 2 schematisch dar. Die dick ausgezogenen Linien kennzeichnen eine mögliche Routing-Struktur zur Verbindung zweier Chips. Es ist ersichtlich, daß jeder Richtungswechsel



**Bild 5: Flexibler Interposer**



**Bild 6: Abladierte Stelle**

einer Leitung durch Kontaktierung eines Querdrahtes erfolgen muß. Eine Verbindungsstruktur erfordert zwei Herstellungsschritte:

- Erzeugung von elektrischen Verbindungen zwischen zwei sich kreuzenden Kupferdrähten
- Unterbrechung von Kupferdrähten zur Vermeidung von Kurzschlüssen.

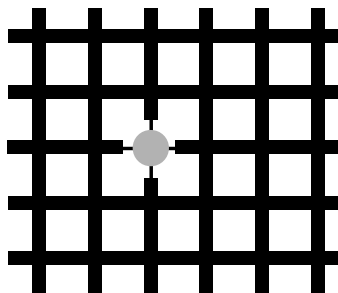
Aus Tabelle 1 wird deutlich, daß die Pitch-Maße von Textilien mit zweilagiger Verbindungsstruktur hochpolige QFP- oder BGA-Gehäuse nicht verdrahten können. Eine Lösung zur Bestückung solcher Komponenten auf Textilien ist die Verwendung eines flexiblen Interposers wie in Bild 5 abgebildet.

## 5 Herstellung einer elektrischen Verbindung

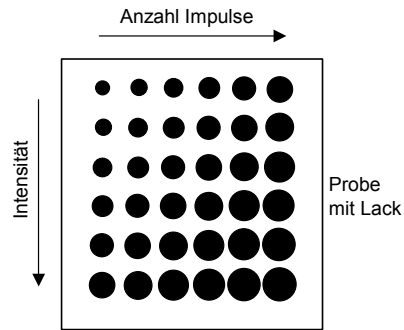
Die Herstellung einer elektrischen Verbindung besteht aus den drei Schritten:

- Ablation
- Verbinden
- Isolation (Schutz)

Im Ablationsschritt wird mittels Laser der Polyesterfaden als auch die Lackschicht auf den Kupferdrähten stellenweise entfernt (siehe Bild 6). Die zwei sich kreuzenden, blanken Kupferdrähte werden danach im Schritt „Verbinden“ mit leitendem Kontaktkleber elektrisch verbunden (siehe Bild 7). Die ausgehärtete Klebestelle kann anschließend mit einem Ober-



**Bild 7: Verbindung mit leitendem Kleber**



**Bild 8: Ablationsmatrix**

flächen-Finish elektrisch isoliert werden.

Die Unterbrüche in den Kupferdrähten werden ebenfalls mit Laser erzeugt. Mit erhöhter Laser-Leistung werden die Kupferdrähte im Textil durchtrennt.

### 5.1 Laseranwendung

In unserem Verfahren wird Laser insgesamt in drei verschiedenen Herstellungsschritten eingesetzt:

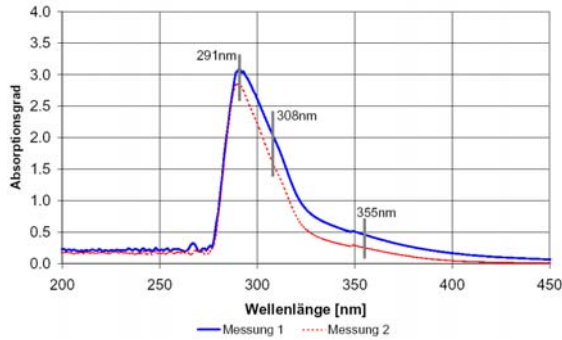
- Polyesterfaden entfernen
- Polyesterimid-Lack des Kupferdrahtes entfernen
- Kupferdraht durchtrennen

Das Durchtrennen des Kupferdrahts ist nicht kritisch, da die Schneideparameter, Intensität und Schneidgeschwindigkeit, für Laser bekannt sind [4]. Beim Entfernen des Polyesters und Polyesterimid-Lacks müssen verschiedene Aspekte berücksichtigt werden. Einerseits soll möglichst keine Verkohlung oder Verklebung des Kupferdrahts durch geschmolzenes Polyester auftreten, andererseits muß der Polyesterimid-Lack vollständig entfernt werden, ohne daß der Kupferdraht beschädigt wird. Die optimalen Ablationsparameter zur Vermeidung der obigen Effekte können mit den folgenden Schritten ermittelt werden:

- Aufnahme des Absorptionsspektrums des zu abladierenden Materials mittels Spektroskopie (UV-Vis Spektrum). Damit kann die optimale Wellenlänge für die höchste Ablationsrate ermittelt werden.
- Aufnahme der Ablationsmatrix (siehe Bild 8) mit Laserintensität und Anzahl Laserimpulse als Parameter. Durch Profil-Ausmessung der Matrix wird die Ablationsrate bestimmt.

### 5.2 Absorptionsspektrum des Lacks

Bild 9 zeigt das Absorptionsspektrum des Polyesterimid-Lacks für zwei Proben, die gemäß der Parameter in Tabelle 2 ausgehärtet wurden. Dazu wurde auf ein dünnes Glassubstrat eine Lackschicht von 2.5µm Dicke bei 2000rpm aufgeschleudert.



**Bild 9: Absorptionsspektrum**

Der Absorptionsgrad ist gemäß Formel (1) definiert, wobei die Transmittanz T der Probe in Prozent vorausgesetzt wird.

$$A = 2 - \log_{10}(T) \quad (1)$$

Die Transmittanz wird im Spektrometer (UV & visuelles Spektrum) durch Vergleich der Probe mit einer Referenz aus demselben Glassubstrat ohne Beschichtung ermittelt.

**Tabelle 2: Aushärteparameter**

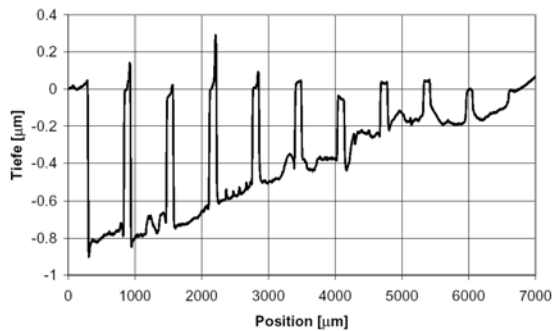
	Temperatur	Dauer
Messung 1	500°C	1 min
Messung 2	300°C	20 min

Bild 9 zeigt, daß ein Excimer-Laser (XeCl mit Wellenlänge 308nm) dem Absorptionsmaximum bei 291nm am nächsten kommt.

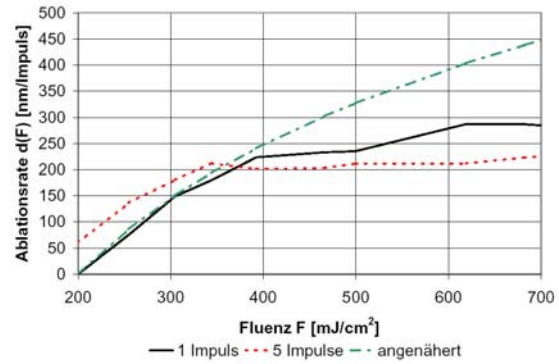
Die Aushärteparameter des Lacks haben keinen großen Einfluß auf die Vernetzung der Polymere und demzufolge auf die Absorption.

### 5.3 Ablationsrate des Lacks

Zuerst wurde wie in Abschnitt 5.2 eine Probe mit Lackschicht hergestellt. Die Ablationsmatrix wurde anschließend für 1, 5, 10 und 20 Laserimpulse bei



**Bild 10: Proben-Oberfläche**



**Bild 11: Ablationsrate d**

unterschiedlichen Energiedichten (Fluenz F) auf der Probe erzeugt. Danach wurde die Oberfläche der Probe mittels Profilometer für jede Zeile der Ablationsmatrix ausgemessen. Bild 10 zeigt ein Beispiel der ablatierten Tiefen einer Zeile in der Matrix. Aus den gemessenen Tiefen konnte die Ablationsrate bestimmt werden. In Bild 11 ist die Ablationsrate in Abhängigkeit der Fluenz für 1 und 5 Impulse dargestellt. Bei mehr als 5 Impulsen wurde die komplette Lackschicht entfernt, so daß die Ablationsrate für 10 und 20 Impulse nicht verifiziert werden konnte.

Der Kurvenverlauf für die Ablationsrate d wird mit der Formel (2) angenähert [5]. Die zugehörige Kurve ist ebenfalls in Bild 11 dargestellt. Für eine bessere Näherung bei kleinen Fluenzen wurden nur Werte bis 400mJ/cm² einbezogen. Die verwendeten Parameter sind in Tabelle 3 aufgelistet.

$$d(F) = \frac{1}{\alpha_{\text{eff}}} \ln\left(\frac{F}{F_{\text{th}}}\right) \left[ \frac{\text{nm}}{\text{Puls}} \right] \quad (2)$$

**Tabelle 3: Ablationsparameter für 308nm Laser**

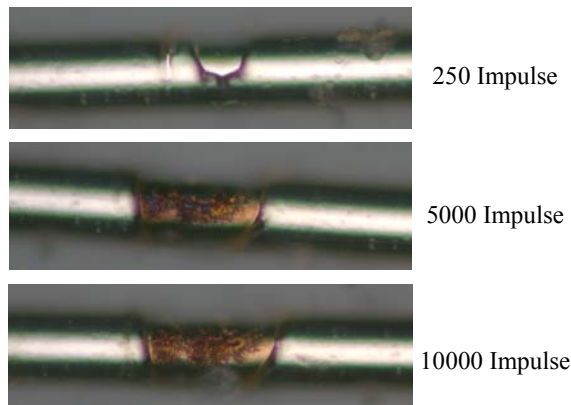
Parameter	Wert
$\alpha_{\text{eff}}$ , effektiver Absorptionskoeff. [ $\text{cm}^{-1}$ ]	0.0028
$F_{\text{th}}$ , Ablationsschwelle [ $\text{mJ}/\text{cm}^2$ ]	200

Der effektive Absorptionskoeffizient wurde mit einer Genauigkeit von  $\pm 0.18 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$  ermittelt.

Somit wird ab einer Fluenz von etwa 400mJ/cm² eine Ablationsrate größer als 200nm pro Impuls erreicht. Um die Lackschicht des Kupferdrahtes (7µm) komplett zu entfernen, sind damit etwa 35 Laser-Impulse nötig.

### 5.4 Entfernen der Lackisolation am Draht

Obwohl sich der Absorptionsgrad schon bei 355nm wesentlich verschlechtert hat (siehe Bild 9), ermittelt



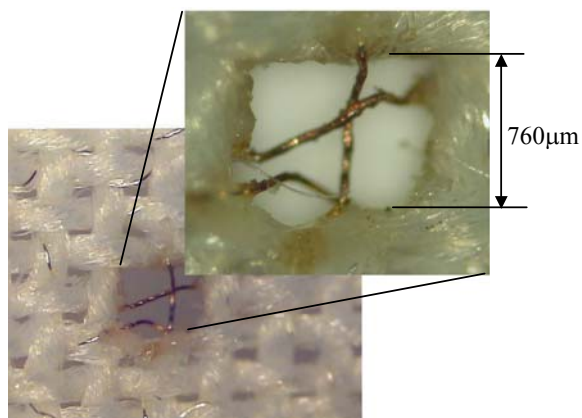
**Bild 12: Versuchsreihe (355nm)**

ten wir die Laserparameter auch für diese Wellenlänge. Bei 355nm kommen Dioden-gepumpte Nd:YAG Laser (3. Harmonische) zum Einsatz. Diese Laser werden typischerweise in der Leiterplattenfertigung zur Herstellung von Microvias verwendet.

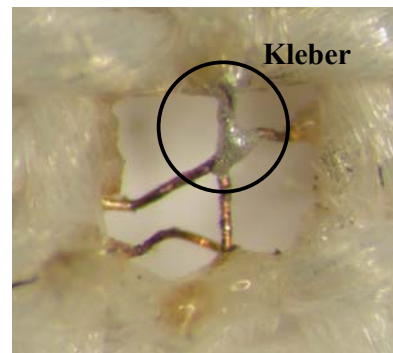
Damit bei der Ermittlung der Laserparameter keine Beeinflussung durch das Polyester im Textil entstand, verwendeten wir einzelne Kupferdrähte (54µm Durchmesser mit 7µm Lackschicht) für die Versuche. Durch mehrere Versuche wurden die Parameter in Tabelle 4 ermittelt. Bild 12 zeigt drei Bilder aus der Versuchsreihe mit 250, 5000 und 10000 Laserimpulsen. Ab 5000 Laserimpulsen wird keine wesentliche Veränderung der Drahtoberfläche mehr festgestellt, die Lackschicht ist komplett entfernt.

**Tabelle 4: Laserparameter für 355nm Laser**

Parameter	Wert
Impulsenergie [ $J/cm^2$ ]	1.01
Repetitionsrate [Hz]	500
Impulsanzahl	5000



**Bild 13: Abladierte Kupferdrähte**



**Bild 14: Kupferdraht-Verbindung**

## 5.5 Entfernen der Isolation im Textil

Mit dem Nd:YAG-Laser (355nm) konnte das Polyestergewebe als auch der Lack in einem Schritt entfernt werden (siehe Bild 13). Für die Ablation des Lackes wurde eine Pulsenergie von 0.19mJ bei einem Fokusbereich von 20µm und 30kHz Pulsrepetitionsrate (entspricht  $60.5 J/cm^2$ ) verwendet. Dabei wurde die abladierende Stelle mit einer Geschwindigkeit von 5 µm/Puls bewegt. Die unterschiedlichen Laserparameter im Vergleich zu den Werten in Tabelle 4 sind darauf zurückzuführen, daß:

- das Polyester zusätzlich entfernt werden mußte.
- die zu abladierende Stelle während des Herstellungsvorgangs bewegt wurde.

Die Positionierung des Lasers wird durch Verwendung eines neuen Textils mit geringeren geometrischen Toleranzen in zukünftigen Versuchen vereinfacht. Im neuen Textil sind die Kupferdrähte direkt ohne Polyester Garn eingewoben.

## 5.6 Herstellen der elektrischen Verbindung

Auf die Kupferdrähte an der abladierten Stelle wurde elektrisch leitender Kleber (Thermoset MLO-01-097) dispensiert, wie dies aus Bild 14 ersichtlich ist. Dazu wurde eine Nadelgröße mit Gauge 27 (Durchmesser 0.2mm) verwendet, wobei der erzeugte Tropfen einen etwa 1.5x größeren Durchmesser als die Nadel besitzt. Zur mechanischen als auch elektrischen Stabilisierung mußte die Klebestelle bei 90°C während 2h ausgehärtet werden.

## 6 Nächste Schritte

Wir werden in einem nächsten Schritt geeignete Globetops untersuchen. Damit läßt sich die Elektronik vor mechanischen Einflüssen, Feuchtigkeit, Licht,

usw. schützen. Ein sinnvoller Ansatz ist ein zweilagiger Globetop: Der erste Guß besteht aus einem starren Epoxy, der die Elektronik von externen Einflüssen schützt. Als zweiter Guß wird ein Silikon-Polymer verwendet, das auf der starren Kapselung eine geschmeidige und elastische Oberfläche erzeugt.

Unsere präsentierte Packaging-Technologie zeigt einen vielversprechenden Ansatz für die Integration von Elektronik in Kleider, ohne deren Tragkomfort zu schmälern.

## 7 Danksagung

Die Autoren danken Dr. E. Ortelli von der Firma Dycorex in Bassersdorf für die Durchführung der Laserexperimente am Textil und Thomas Dumont vom Paul Scherrer Institut in Villigen (PSI) für die Unterstützung bei der Aufnahme des Absorptionsspektrums. Außerdem danken wir Dr. B. Neuenschwander vom Institut für angewandte Lasertechnologie (IALT) in Burgdorf für die Hilfe bei den ersten Laserexperimenten. Besonderem Dank sind wir der Firma ElektroFeindraht AG in Escholzmatt verpflichtet für die Unterstützung bei den Materialien und Lack-Untersuchungen.

## 8 Literatur

- [1] D. Cottet, J. Grzyb, T. Kirstein und G. Tröster, „Electrical Characterization of Textile Transmission Lines“, IEEE Transactions on Advanced Packaging, vol. 26, no. 2, pp. 182-190, Mai 2003.
- [2] U. Anliker, P. Lukowicz, G. Tröster, S. J. Schwartz und R. W. DeVaul, “The WearARM: Modular, High Performance, Low Power Computer Platform Designed for Integration into Everyday Clothing”, Proc. IEEE ISWC, pp. 167-168, Okt 2001.
- [3] S. Park, K. Mackenzie und S. Jayaraman, “The Wearable Motherboard: A Framework for Personalized Mobile Information Processing (PMIP)”, Proc. ACM/IEEE DAC, pp. 170-174, Juni 2002.
- [4] D. Bäuerle, “Laser Processing and Chemistry”, Springer-Verlag, New York, 2000.
- [5] T. Lippert, M. Hauer, C. R. Phipps und A. Wokaun, „Polymers designed for laser applications: fundamentals and applications“, Proc. SPIE, vol. 4760, 63 (2002).