

## Kontinuierliches Fügen von metallischen Folien mit thermoplastischen Textilien

# Flexible, leitfähige Strukturen mit Laserschweißen

R. T. Boich, N. Hannes, F. Brackman

**ZUSAMMENFASSUNG** Die Textilindustrie steht im Bereich „Wearable Technologies“ vor Herausforderungen. Bestehende Verfahren zur Herstellung leitfähiger Verbindungen auf Textilien zeigen Schwächen. Eine vielversprechende Lösung ist das Lasertransmissionsschweißen. Um dieses Verfahren auf einen kontinuierlichen Rolle-zu-Rolle-Prozess zu übertragen, wird ein Maschinenkonzept entwickelt. Dieses wird in einer Testreihe mit dem Ziel, das Verfahren in eine bestehende Rolle-zu-Rolle-Anlage zu integrieren, validiert.

### STICHWÖRTER

Flexible Fertigungssysteme, Fügeverfahren, Lasertechnik

## Flexible, conductive structures by laser welding – Continuous joining of metallic foils with thermoplastic textiles

**ABSTRACT** The textile industry is facing challenges with a view to wearable technologies. Existing processes for the production of conductive connections on textiles exhibit weaknesses. One promising solution is laser transmission welding. To transfer this method to a continuous roll-to-roll process, a machine concept has been developed. This is being tested in a series of tests aiming at integrating the process into an existing roll-to-roll system.

## 1 Herstellungsverfahren elektrisch leitfähiger und flexibler Komponenten

Die Kombination aus Elektronik und Textilien wird als elektrisch leitfähige Textilien – auch „Smart Textiles“ – bezeichnet. Sie bestehen im Grundprinzip aus einem flexiblen Trägermaterial (Textil), in welches eine leitfähige Komponente (zum Beispiel leitfähiges Garn) integriert wird [1, 2]. Der Vorteil von Smart Textiles liegt primär in der Integrationsfähigkeit des Textils in nahezu beliebige Endprodukte begründet. Forschungs- und Entwicklungsbemühungen fokussieren dabei unter anderem auf die Kommunikationstechnologie, militärische Anwendungen und die Unterhaltungs- und Gesundheitsindustrie. Beispielhafte Anwendungen textiler Elektronik sind Antistatika, der Einsatz zur Abschirmung elektromagnetischer Strahlung oder die Überwachung von Vitalitätsdaten [3, 4]. Damit die Textilien in Alltagsanwendungen integriert werden können, ist die Funktionsfähigkeit der Sensorik unter mechanischer Verformung, Reibung, Waschvorgängen und generellen Anforderungen des normalen Tragens sicherzustellen. Daher werden die elektrischen Komponenten in Smart Textiles flexibel konstruiert. [1, 5, 6]

Um zwei Komponenten miteinander zu fügen, gibt es unterschiedliche Fügeverfahren. Es werden verschiedene Funktionsprinzipien zur Erreichung der Verbundfestigkeit unterschieden. Eine Verbindung kann durch Adhäsion, Kraft-, Form- oder Stoffschluss entstehen. **Tabelle 1** zeigt eine Übersicht verschiedener Fügeverfahren für Textilien mit jeweiligem Funktionsprinzip [7].

In der Vergangenheit wurden unterschiedliche Verfahren zur direkten Integration leitfähiger Materialien in Textilien im Produktionsprozess entwickelt. Insbesondere in den Prozessen der

**Tabelle 1.** Bindungsprinzip, Fügeverfahren und Funktionsprinzip zum Fügen verschiedener Materialien.

Bindungsprinzip	Verfahren	Funktionsprinzip
Adhäsion	Kleben	Physikalisch Chemisch
Kraftschluss	Tuften Vernadeln	Fadendurchdringung Faserreibung
Formschluss	Nähen/Sticken Kurzwaren	Fadendurchdringung/- verschlingung Bauteilgeometrie
Stoffschluss	Schweißen (thermisch)	Wärmeleitung Konvektion Innere Reibung Wärmestrahlung

Flächenherstellung (Weben, Stricken und Wirken) sowie der Textilveredlung (Sticken, Beschichten, Bedrucken) ergeben sich Möglichkeiten zur Integration leitfähiger Materialien. Stickverfahren erlauben beispielsweise einen frei wählbaren Verlauf der Leiterbahnen und können elektronische Bauteile direkt fixieren. Allerdings sind die Möglichkeiten für großflächige Anwendungen begrenzt und erfordern einen hohen Aufwand. Dagegen sind Beschichtungs- und Druckverfahren für den Auftrag großflächiger und robuster, leitfähiger Schichten geeignet. Jedoch sind diese Verfahren technisch sehr aufwendig, schwer reproduzierbar und komplex in der Prozessführung. [2] Die wichtigsten herkömmlichen Verfahren zur Herstellung von Smart Textiles sind in **Tabelle 2** zusammengetragen. Ein einfacheres Verfahren stellt das

Tabelle 2. Herkömmliche Verfahren zu Herstellung leitfähiger Textilien.

Prozessschritt	Herstellungsprinzip	Leitfähiges Material
Flächenherstellung	Weben	<ul style="list-style-type: none"><li>• Intrinsisch leitfähige Garne/Faser<ul style="list-style-type: none"><li>◦ Drähte, Metallfasern</li><li>◦ Garne aus leitfähigen Polymeren</li></ul></li><li>• Leitfähig beschichtete Garne/Fasern</li></ul>
	Stricken	
	Wirken	
Veredelung	Sticken	<ul style="list-style-type: none"><li>• Flüssige Beschichtungen<ul style="list-style-type: none"><li>◦ Walzenauftrag, Rakeln</li></ul></li><li>• Gasphasenabscheidung<ul style="list-style-type: none"><li>◦ ALD, PVD, CVD</li></ul></li></ul>
	Beschichten	
	Bedrucken	<ul style="list-style-type: none"><li>• Siebdruck</li><li>• Inkjetdruck</li></ul>

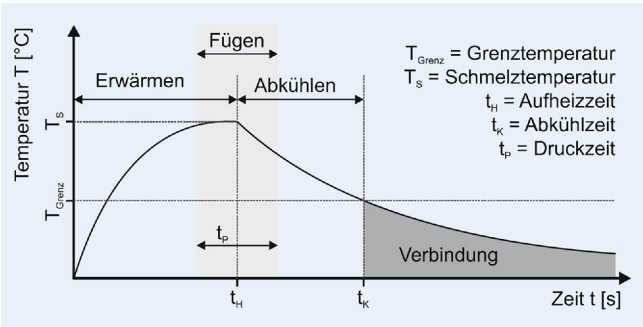


Bild 1. Ablauf des Schweißprozesses. Grafik: nach [8, 9]

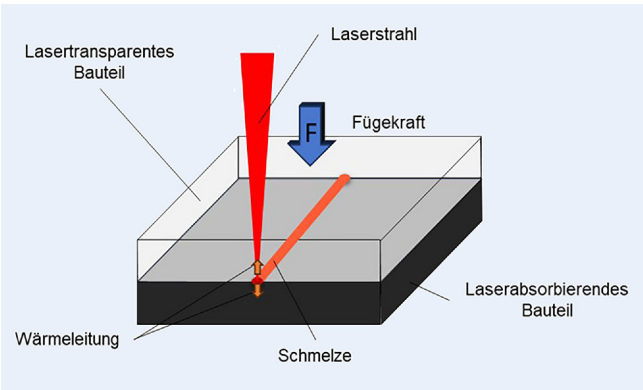


Bild 2. Funktionsprinzip des Laserdurchstrahlschweißens Grafik: [11]

Aufschweißen leitfähiger Folien auf Textilien dar. Dafür wurde am ITA in Kooperation mit dem EMPA (interdisziplinäres Forschungsinstitut der ETH-Bereichs für Materialwissenschaften und Technologieentwicklung) und dem Fraunhofer ILT ein Prozess entwickelt.

2 Schweißen von Textilien

In der Verbindungstechnik umfasst der Begriff „Schweißen“ sämtliche Verfahren, die darauf abzielen, thermische Energie in die zu verbindenden Materialien einzubringen. Wie in Bild 1 [8, 9] dargestellt, werden dabei die Materialien bis zu ihrer Erweichungs- oder Schmelztemperatur ( $T_s$ ) erwärmt, gefolgt von einer Zusammenfügung unter Druck. Wegen dieser Vorgehens-

weise zählt das Schweißen zu den thermischen oder stoffschlüssigen Fügeverfahren. Entscheidende Parameter für die Qualität der Schweißnaht sind dabei die Schweißtemperatur, der anliegende Fügedruck sowie die Einwirkzeit. Abhängig von der Methode der Energiezufuhr werden die Schweißverfahren in unterschiedliche Kategorien eingeteilt. [2, 7, 10]

Beim Laserschweißen werden direkte und indirekte Verfahren unterschieden. Beim direkten Verfahren wird Strahlungsenergie direkt in die Fügefläche fokussiert, während beim indirekten Verfahren, auch Wärmeleitungsschweißen genannt, die Energie durch die Fügeteile zur Fügefläche transportiert wird [11]. Ein in der Serienfertigung etabliertes Verfahren ist das Laserdurchstrahlschweißen. Es zählt zu den indirekten Verfahren und ist aufgrund seines einstufigen Prozesses – da Erwärmung und Fügevorgang nahezu zeitgleich erfolgen – geeignet für die Serienproduktion von Bauteilen. Die Laserstrahlung durchdringt den oberen Fügepartner (hoher Transmissionsgrad notwendig) und wird an der Kontaktfläche vom unteren Fügepartner absorbiert und in Wärmeenergie umgewandelt. Durch Wärmeleitung und Druck werden beide Fügeteile im Bereich der Fügezone plastifiziert.

Die Vorteile dieses Verfahrens liegen in der berührungslosen Energieeintrbringung, einer kleinen Wärmeeinflusszone (dünne Materialien schweißbar), der Möglichkeit nahezu beliebige Nahtgeometrien zu realisieren, der Vermeidung einer mechanischen Belastung der Schweißnaht und dem optisch guten Erscheinungsbild der Schweißnaht begründet. Diese Merkmale eröffnen diverse Anwendungsmöglichkeiten. Es gibt jedoch auch Nachteile, darunter die Notwendigkeit eines technischen Nullspalts zwischen den Fügepartnern, die unterschiedlichen optischen Eigenschaften der Materialien und die notwendige Zugänglichkeit der Schweißnaht für den Laserstrahl [11, 12]. Das Funktionsprinzip des Laserdurchstrahlschweißens ist in Bild 2 dargestellt.

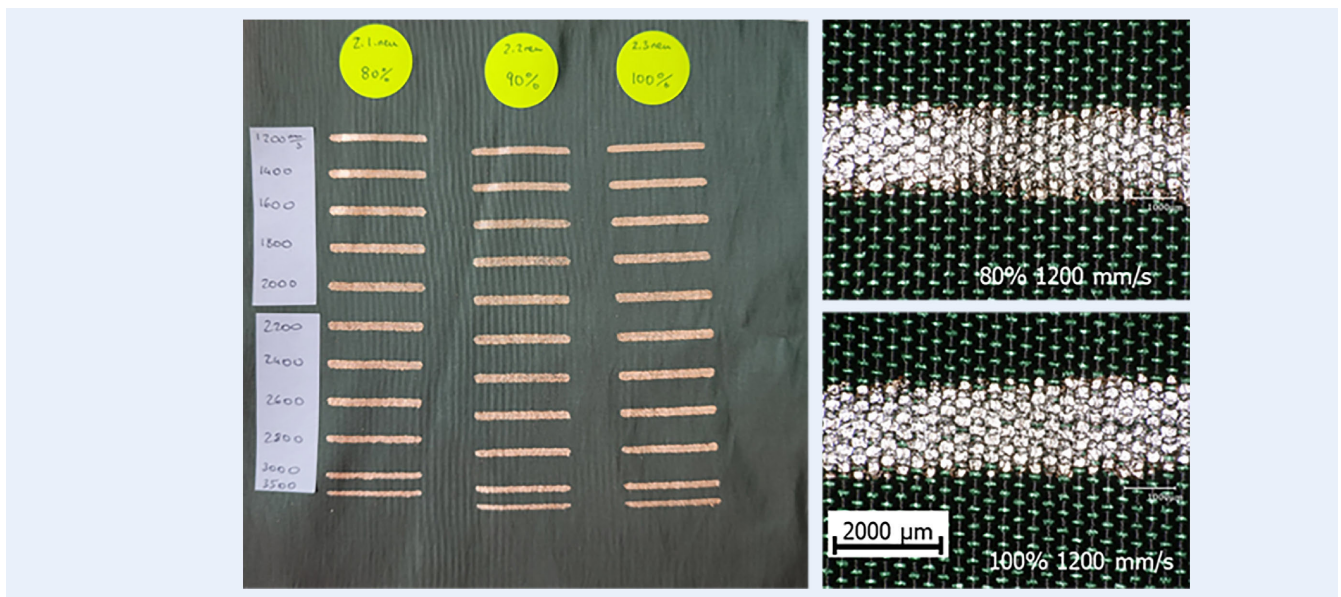
3 Kontinuierliche Produktionsverfahren

Kontinuierliche Herstellungsmethoden, bei denen Stoffbahnen von einer Rolle zur anderen ver- und bearbeitet werden, werden in der Textilindustrie Rolle-zu-Rolle-Verfahren (R2R-Verfahren) genannt. Ein Beispiel ist das Abwickeln von Rohgewebe, welches anschließend vorbehandelt, bedruckt oder beschichtet wird. Abschließend wird das fertige Produkt auf einer zweiten Rolle aufgewickelt. Durch diese kontinuierliche und automatisierbare Art der Herstellung werden hohe Stückzahlen bei minimalen Stillstandzeiten möglich. [13, 14]

Eine hohe Effizienz bei gleichbleibender Qualität und niedrigen Arbeitskosten sind Vorteile dieses Verfahrens, während eine eingeschränkte Design-Flexibilität und hohe Investitionskosten dem gegenüberstehen. Notwendige Komponenten eines Rolle-zu-Rolle-Systems sind ein Ab- und Aufwickelsystem, ein Behandlungs- und ein Kontrollsystem.[13]

Beispiele, in denen das Verfahren bei der Herstellung Anwendung findet, sind:

- Flexible elektronische Geräte
- Flexible Photovoltaik
- Dünnschicht-Batterien
- Membranen
- Industrielle Beschichtungen
- Produkte für die Medizin-, Bau- und Papierindustrie [13, 15–17]



**Bild 3.** Links: geschweißte Versuchsreihe, rechts: Mikroskopaufnahme der Leiterbahn. Foto: ITA of RWTH Aachen

## 4 Schweißversuche

Am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT haben erste Versuche zum Verschweißen von Kupferfolie auf ein Polyestergewebe stattgefunden. Genutzt wurde eine wassergekühlte Strahlquelle der Firma Nuburu Inc., Centennial/USA mit einer Wellenlänge von 450 nm, was blauem Licht entspricht, und einer maximalen Leistung von 150 W. Blaue Strahlquellen sind in der Industrie vor allem für die Batteriekontaktierung sehr verbreitet, da Kupfer bei dieser Wellenlänge eine gute Absorption zwischen 50 % und 60 % besitzt. Der in dem Aufbau verbaute Scanner der Firma Newson NV, Dendermonde/Belgien ermöglicht eine maximale Ablenkgeschwindigkeit von 3000 mm/s.

Um einen ersten Eindruck der möglichen Bandgeschwindigkeiten in einem Rolle-zu-Rolle-Prozess zu bekommen, wurden Geschwindigkeiten zwischen 1000 mm/s und 3000 mm/s und Leistungen von 25–110 W miteinander kombiniert und anschließend die Leitfähigkeit der 25 mm langen Leiterbahnen bestimmt. Eine Versuchsreihe samt Mikroskopaufnahmen einzelner Kombinationen ist in **Bild 3** zu sehen.

Die besten Ergebnisse bezüglich Aussehen und Leitfähigkeit der Leiterbahnen wurden bei Geschwindigkeiten von 1000 m/s bis 1200 m/s und einer Leistung von 110 W erzielt. Die Struktur des Textils ist innerhalb der Leiterbahn gut erkennbar, sodass von einer geringen Zerstörung aufgrund der Hitzeeinwirkung durch den Laser ausgegangen wird.

## 5 Ausblick

In diesem Beitrag wurde das Lasertransmissionsschweißen zur Herstellung flexibler, leitfähiger Textilien untersucht. Diese Technik ermöglicht die Integration von Elektronik in Textilien, was für Smart Textiles in verschiedenen Branchen relevant ist. Erste Schweißversuche zeigten gute Ergebnisse bei der Verwendung von Kupferfolie auf Polyestergewebe, insbesondere bei Geschwindigkeiten von 1000–1200 mm/s und einer Leistung von 110 W.

Zukünftig soll das Verfahren in einen kontinuierlichen Rolle-zu-Rolle-Prozess integriert werden, um die Produktionseffizienz zu steigern und die Kosten zu senken. Dies erfordert jedoch weitere Optimierungen der Prozessparameter. Insgesamt zeigt das Lasertransmissionsschweißen großes Potenzial für die Weiterentwicklung von Smart Textiles.

### FÖRDERHINWEIS

Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz über die AiF im Rahmen des IGF-Projekts Nr. 22915 N der Forschungsvereinigung Forschungskuratorium Textil e.V. (FKT).

### L i t e r a t u r

- [1] Stoppa, M.; Chiolerio, A.: Wearable electronics and smart textiles: a critical review. *Sensors* 14 (2014) 7, pp. 11957–11992
- [2] Seidenberg, M.: Lasertransmissionsschweißen als Verfahren zur Erzeugung elektrisch leitfähiger Strukturen auf textilen Substraten. – Masterarbeit, RWTH Aachen University, 2018
- [3] Ismar, E.; Kurşun Bahadır, S.; Kalaoglu, F. et al.: Futuristic Clothes: Electronic Textiles and Wearable Technologies. *Global challenges* 4 (2020) 7, #1900092
- [4] Sonnenschein, J.: Untersuchung von Prozessgrößen beim Laserdurchstrahlungsschweißen von Metallfolien auf thermoplastischen Textilien. Bachelorarbeit RWTH Aachen University, 2023
- [5] Fromme, N. P.; Li, Y.; Camenzind, M. et al.: Metal-Textile Laser Welding for Wearable Sensors Applications. *Advanced Electronic Materials* 7 (2021) 4, #2001238
- [6] Weng, W.; Chen, P.; He, S. et al.: Smarte elektronische Textilien. *Angewandte Chemie*. 128 (2016) 21, S. 6248–6277
- [7] Gries, T.; Klopp, K. (Hrsg.): Füge- und Oberflächentechnologien für Textilien. Heidelberg: Springer-Verlag 2007
- [8] Cherif, C. (ed.): *Textile Werkstoffe für den Leichtbau*. Heidelberg: Springer 2011
- [9] Hoehr, L.: Konstruktion eines Druckwerkzeuges für das Laserschweißen. Masterarbeit, RWTH Aachen University, 2015

- [10] Kaiser, W.: Kunststoffchemie für Ingenieure. München: Carl Hanser Verlag 2015
- [11] Hopmann, C.; Michaeli, W.: Einführung in die Kunststoffverarbeitung. München: Carl Hanser Verlag 2017
- [12] Marina, M.: Laserschweißen von Textilien. Studienarbeit. Reutlingen: Hochschule Reutlingen 2018
- [13] Williams, Bryon: Roll-to-Roll Processing: The Basics. Stand: 2023, Internet: [www.montalvo.com/roll-to-roll-processing-basics/](http://www.montalvo.com/roll-to-roll-processing-basics/). Zugriff am 24.07.2024
- [14] Barz, J.; Umlauf, G.: Rolle-zu-Rolle-Verfahren: Beschichtung und Strukturierung, Internet: [www.igb.fraunhofer.de/de/forschung/funktionale-oberflaechen-und-materialien/verfahren/rolle-zu-rolle-beschichtung-und-strukturierung.html](http://www.igb.fraunhofer.de/de/forschung/funktionale-oberflaechen-und-materialien/verfahren/rolle-zu-rolle-beschichtung-und-strukturierung.html). Zugriff am 23.07.2024
- [15] Ulsh, M.: Roll-to-Roll Manufacturing Multilab Collaboration. Stand: 2023. Internet: [www.nrel.gov/manufacturing/roll-to-roll-multilab.html](http://www.nrel.gov/manufacturing/roll-to-roll-multilab.html). Zugriff am 21.11.2023
- [16] Abbel, R.; Galagan, Y.; Groen, P.: Roll-to-Roll Fabrication of Solution Processed Electronics. Advanced Engineering Materials. 20 (2018) 8, #1701190
- [17] Schulz-Ruhtenberg, M.; Kolbusch, T.; Abreu Fernandes, S.; et al.: Seminal Tools for Roll-to-Roll Manufacturing Laser Technik Journal. 11 (2014) 1, pp. 21–25



**Robert T. Boich, M.Sc.**


Foto: Autor

[robert.boich@ita.rwth-aachen.de](mailto:robert.boich@ita.rwth-aachen.de)

Tel. +49 241 80-49152

**Neele Hannes, M.Sc.**

ITA – Institute for Textile Technology  
of RWTH Aachen University  
Otto-Blumenthal-Str. 1, 52074 Aachen  
[www.ita.rwth-aachen.de](http://www.ita.rwth-aachen.de)

**Friederike Brackmann, M.Sc.** 

[friederike.brackmann@ilt.fraunhofer.de](mailto:friederike.brackmann@ilt.fraunhofer.de)

Tel. +49 241 8906 161

Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT  
Steinbachstr. 25, 52074 Aachen  
[www.ilt.fraunhofer.de](http://www.ilt.fraunhofer.de)

## LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons  
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)