

BEWERTUNG VON PRODUKTIONSTECHNOLOGIEN FÜR SMART TEXTILES MIT DEM POTENZIAL EINER MATERIALTRENNUNG FÜR RECYCLING

Robin Oberlé¹ Autor, Büsra Unay¹ Co-Autor

¹ *RWTH Aachen – Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University (Germany)*

Arbeitsgruppenleiter: Robert Boich – Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University (Germany)

Abstract

In den vergangenen Jahren haben Weiterentwicklungen in Bereichen der leitfähigen Materialien und Fasern sowie immer kleiner werdender Elektronik deutliche Fortschritte gemacht und die Entwicklung von Smart Textiles vorangetrieben. Dem Durchbruch auf dem Massenmarkt stehen allerdings noch einige Herausforderungen bevor. Die derzeit eingesetzten Produktionstechnologien für Smart Textilien erzielen keine skalierbaren und marktfähigen Produkte. Daher werden sie bisher nur in begrenzten Stückzahlen gefertigt und sind als Prototypen oder Demonstrationsprodukte erhältlich. Diese sind in der Regel mit vielen manuellen Fertigungsschritten behaftet und führen zu hohen Herstellungskosten. Auch die Entsorgung und Recyclingfähigkeit von Smart Textiles stellen eine große Herausforderung dar. Das Ziel dieses Forschungsansatzes ist es, ein Produktionsverfahren zu ermitteln, welches sowohl die Recyclingfähigkeit von Smart Textiles und seinen Komponenten berücksichtigt als auch den erwünschten Anforderungen und Belastungen eines Smart Textiles gerecht wird. [Ing19]

Einleitung

Smart Textiles, auch bekannt als intelligente Textilien, vereinen Textilien und Elektronik und schaffen multifunktionale Textilien. Ihre Fähigkeit, mit ihrer Umgebung und ihren Benutzern interagieren zu können, hat das Potenzial, unseren Alltag sowie verschiedene Industriezweige zu revolutionieren. Smart Textiles werden in Bereichen wie der Automobilindustrie, dem Bauwesen, dem Sportsektor oder der Medizin eingesetzt und können beispielsweise die Überwachung von Vitalparametern übernehmen. Durch die zunehmende Digitalisierung und Vernetzung der Welt spielen Smart Textiles eine immer größere Rolle.

Allerdings ist die Herstellung von Smart Textiles ein komplexer Prozess, der verschiedene Technologien und Materialien erfordert. Häufig eingesetzte Verfahren, wie beispielsweise das Löten, sind nicht sehr nachhaltig und können aufgrund der hohen Temperaturen während der Bearbeitung zur Beschädigung der Textilsubstrate führen. [AS17]

Methode

Anhand einer strukturierten Literaturrecherche (Abbildung 1) werden Datenbanken durchsucht, Ergebnisse gesichtet und anschließend bewertet. Anschließend werden vergangene Forschungsarbeiten zusammengefasst und ein Überblick geschaffen. Die Suche wird in drei Phasen eingeteilt: Planung der Suche, Durchführung der Suche und Dokumentation. Damit wird eine umfassende und erfolgreiche Suche sichergestellt. Um möglichst viele und relevante Quellen zu erfassen, werden mehrere Datenbanken abgedeckt und eine Vorwärts- und Rückwärtsrecherche durchgeführt. Abschließend werden die Ergebnisse hinsichtlich Zukunftspotential, Wirtschaftlichkeit und Automatisierbarkeit bewertet.

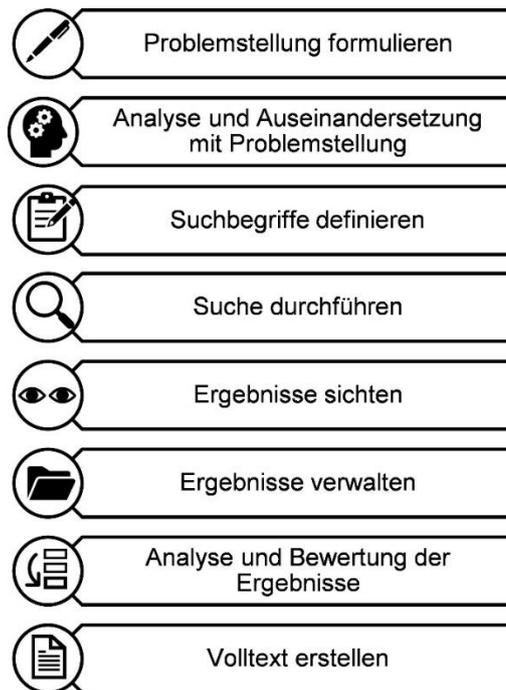


Abbildung 1: Ablauf systematischer Literaturrecherche. Quelle: [BSN+19; XW19]

Ergebnisse

Auswertung bestehender Produktionsverfahren

Folgende Produktionsprozesse für Smart Textiles wurden in die Analyse mit einbezogen.

- Direktes Lötten
- Roboterunterstütztes Ultraschalllötten
- Nd: YAG-Laserlötten
- Ultraschallplastikschweißen
- 3D-Druckverfahren
- Flüssiger Metalldruck
- Dampfbeschichten
- Nanobeschichten
- Siebdruckverfahren
- Transfersiebdruckverfahren
- Integration faserbasierter Elektronik
- Nahtlose Integration

Einige Produktionsverfahren für Smart Textiles haben sich bereits in anderen Industriezweigen bewährt und zeigen sich als effiziente Option für die Herstellung Smart Textiles.

Das „direkte Lötverfahren“, „roboterunterstützte Ultraschalllötten“, „Transfersiebdruck- bzw. Siebdruckverfahren“, „Nanobeschichtungsverfahren“ und das „Ultraschallplastikschweißen“ sind bereits etablierte Verfahren. Sie sind in der Lage große Produktionsmengen effizient zu verarbeiten oder in Rolle-zu-Rolle Produktionen integriert zu werden. Zudem bieten die Verfahren „direktes Lötten“ und „Siebdruckverfahren“ kurze Prozesszeiten und geringe Kosten.

Verfahren wie das „Nd: YAG-Laserlötten“, die „Integration faserbasierter Elektronik“, „Dampfbeschichtungsverfahren“ und „flüssig Metall-Druckverfahren“ sind wiederum weniger gut geeignet, um große Mengen herzustellen. Obwohl sie vielversprechende Ansätze darstellen, erfordern sie aktuell noch weitere Forschung und technologische Fortschritte. Bei den Verfahren „roboterunterstütztes Ultraschalllötten“ und der „faserbasierte Integration“ ist außerdem mit hohen Anschaffungs- und Materialkosten zu rechnen.

Nachhaltigkeit

In Bezug auf Nachhaltigkeit stellt der Einsatz von Silber in Verfahren wie dem „direkten Lötten“ und dem „roboterunterstützten Ultraschalllöten“ Bedenken dar. Silber ist eine begrenzte Ressource und braucht für seine Gewinnung einen hohen Energie- und Wasserverbrauch. Zudem kann die Wiederverwendung von Silber sehr anspruchsvoll werden und spezielle Verfahren erfordern, die ebenfalls mit sehr hohem Energieverbrauch und Kosten verbunden werden. Auch besteht die Gefahr, dass während des Lötens die Textilsubstrate beschädigt werden, wodurch zusätzlicher Abfall entsteht. Ebenfalls stellt das Trennen von Lot und Textil eine Herausforderung dar, wodurch Reparaturen oder der Austausch kaputter Komponenten, ohne Beschädigung des Textils, sehr schwer durchführbar sind.

Analoges Verhalten gilt für die Verfahren „roboterunterstütztes Ultraschalllöten“, „Nd: YAG-Laserlöten“ und dem „Siebdruckverfahren“, die ebenfalls silberhaltige Lote und Lösungen verwenden. Auch nahtlose „Integrationsverfahren für faserbasierte Elektronik“ erweisen sich nicht als sehr nachhaltige Verfahren, obwohl sie stark im Fokus der Forschung stehen. Es sind aufwendige Verfahren, die aus mehreren Prozessschritten bestehen, beginnend mit der Herstellung der faserbasierten Elektronikgarne, über die Einarbeitung ins Gewebe bis hin zur Erstellung leitfähigen Verbindung. [MHG20; HHY19]

Im Gegensatz dazu zeigen das „Dampfbeschichtungsverfahren“ und das „Nanobeschichtungsverfahren“ nachhaltigere Merkmale, da sie umweltfreundliche und organische Gemische verwenden. Ebenfalls zeichnet sich das „3D-Druckverfahren“ durch seinen genauen Materialverbrauch als ressourcenschonendes Verfahren aus, mit dem Abfall vermieden und Ressourceneffizienz gesteigert wird. [AZC+18; FHB+16] Im Vergleich zu den anderen Fertigungsverfahren verwendet das „3D-Druckverfahren“ weniger Rohmaterial, Wasser, Energie und Chemikalien. Defekte Komponenten können leicht ausgetauscht und repariert werden. Darüber hinaus können recyclebare Materialien sowie verschiedenen Materialkombinationen eingesetzt werden, um verschiedenen Eigenschaften zu erreichen.

Das „3D-Druckverfahren“ ermöglicht die Erstellung komplexer Formen und individueller Strukturen, die aufgeschmolzen und erneut für den Druck wiederverwendet werden können. Es kann sowohl zum Verbinden von Komponenten eingesetzt werden als auch zur Erstellung von Halterungen für SMD-Komponenten oder zur Einkapselung der Elektronik. Im Vergleich zu den anderen Verfahren kann auch mit deutlich weniger Anschaffungs- und Materialkosten gerechnet werden. Laufende Textilherstellungsprozesse müssen bei ihrer Integration nicht unterbrochen werden, sondern können als Add-On-Verfahren nach der Textilherstellung in die Prozesskette integriert werden. Zudem können durch die Auswahl der Filamente, Belastbarkeit und Flexibilität entsprechend kundenspezifische Anforderungen ausgesucht werden. Auch können einzelnen Komponenten problemlos entfernt und recycelt werden, was mit unlöslichen Verbindungen wie dem „direkten Lötverfahren“ oder der „faserbasierten Integration“ nicht möglich ist. Durch den Einsatz von Kunststoffmaterialien wird zudem auf begrenzte Ressourcen verzichtet und mit alternativen Materialien wie biobasierte Kunststoffe besteht die Möglichkeit den ökologischen Fußabdruck zu reduzieren. [Gon23; GGY+22; KGK22]

Recycling

Aktuell fehlen konkrete Recyclingverfahren, wie es sie für die Textil- oder Elektronikindustrie gibt. Allerdings gibt es zwei Ansätze zum Recyceln von Smart Textiles Komponenten.

Es besteht zum einen die Möglichkeit, recycelte SMD-Komponenten aus anderen Einsatzbereichen in Smart Textiles einzusetzen. Hierbei sollen die zu recycelten SMD-Komponenten mittels eines UV-härtenden, nicht leitenden Acrylklebstoff auf das elektrisch leitfähige Textilband angebracht und ausgehärtet werden. Folgende Schritte werden bei diesem Ansatz durchlaufen:

- Sammeln der Produkte am Ende ihrer Lebensdauer.
- Entfernen der Textilbänder.
- Band auf Oberfläche mit Aceton für 20 Minuten mit Komponenten nach oben platzieren.

- Band aus Aceton nehmen und Komponenten manuell mit Pinzette oder automatisch mit industriellem Roboterarm entnehmen.
- Umweltfreundliche Entsorgung von gebrauchten Band- und Kleberückständen.
- Visuelle und funktionelle Kontrolle der entfernten Komponenten und in drei Gruppen einsortieren: Perfekt Komponenten, Komponenten mit geringfügigen mechanischen Schäden ohne Beeinträchtigung ihrer Funktion und beschädigte Komponenten.
- Reinigung der Komponenten und Rückstände mit Isopropylalkohol.
- Herstellung neuer Proben mit den neuen Bändern und gebrauchten Komponenten.
- Funktionstest der neuen Proben und einsortieren in zwei Qualitätskategorien: perfekt, und zweite Qualität. [HBN+23]

Zum anderen besteht die Möglichkeit, das Textilsubstrat des Smart Textiles zu recyceln und wieder zu verwenden. Dafür müssen die Webstühle angepasst werden, sodass eine vollständige Entwirrung des Garns am Ende seiner Lebenszeit möglich wird und diese gewaschen und wiederverwendet werden kann. Diese Methode kann erweitert werden, indem ein Smart Textile aus verschiedenen unabhängigen Modulen zusammengesetzt wird, die individuell aufgelöst und verändert werden können. Dies ermöglicht eine hohe Anpassbarkeit an individuelle Bedürfnisse sowie eine einfache Austauschbarkeit defekter Komponenten, ohne das gesamte Produkt wegwerfen zu müssen [WD20]

Bewertung der Produktionsprozesse

Auf Basis der Auswertung der Produktionsverfahren und der diskutierten Nachhaltigkeits- sowie Recycling-Aspekte werden die Verfahren anhand einer Skala von 1 bis 3 bewertet (Tabelle 1).

Tabelle 1: Bewertung der Produktionsverfahren

Verfahren	Skalierbarkeit	Nachhaltigkeit	Wirtschaftlichkeit
Direktes Lötten	3	1	2
Roboterunterstütztes Ultraschalllötten	3	1	2
ND: Yag-Laserlötten	1	1	2
Ultraschallplastikschweißen	2	2	2
3D-Druckverfahren	2	3	2
Flüssiger Metalldruck	1	1	1
Dampfbeschichten	2	2	2
Nanobeschichten	2	2	2
Siebdruckverfahren	3	1	2
Transfersiebdruckverfahren	1	1	2
Integration faserbasierter Elektronik	3	1	1
Nahtlose Integration	1	1	1

Aus der Bewertung geht das 3D-Druck-Verfahren mit der besten Bewertung hervor. Auf Basis dieses Verfahrens wird der dargestellte Prozessablauf (Abbildung 2) zur Herstellung von Smart Textiles vorgeschlagen.

- Zuerst wird das Textilsubstrat auf den angepassten Webstühlen entwirrbar hergestellt.
- Mit dem 3D-Druckverfahren werden recycelte Elektronikkomponenten auf dem Textil angebracht und Verbindungen aufgedruckt.

In zukünftigen Untersuchungen sollten spezifische leitfähige oder abbaubare Materialien sowie ihre elektrischen Eigenschaften in Kombination mit dem 3D-Druckverfahren weiter untersucht werden. Zudem ist es wichtig, umfassende Analysen zum gesamten Herstellungsprozess von der Faser bis zum Smart Textiles durchzuführen. Hinsichtlich des 3D-Druckverfahrens fehlt es aktuell an Forschung bezüglich des großflächigen Bedruckens von Smart Textiles.

Literaturverzeichnis

- [AS17] Amft, O.; Schneegass, S. (Hrsg.):
Smart Textiles.
1st ed. 2017. - Cham: Springer International Publishing; Imprint: Springer, 2017
- [AZC+18] Andrew, T. L.; Zhang, L.; Cheng, N.; Baima, M.; Kim, J. J.; Allison, L.; Hoxie, S.:
Melding Vapor-Phase Organic Chemistry and Textile Manufacturing To Produce Wearable Electronics
ACCOUNTS OF CHEMICAL RESEARCH. 51 (2018) 4, S. 850–859
- [BSN+19] Blümle, A.; Sow, Dorothea; Nothacker, Monika; Schaefer, Corinna; Motschall, E.;
Boeker, Martin; Lang, Britta; Kopp, Ina; Meerpohl, Jörg J.:
Manual systematische Recherche für Evidenzsynthesen und Leitlinien, 2019
- [FHB+16] Feng, J.; Hontanon, E.; Blanes, M.; Meyer, J.; Guo, X.; Santos, L.; Paltrinieri, L.;
Ramlawi, N.; Smet, L. C. P. M. de; Nirschl, H.; Kruis, F. E.; Schmidt-Ott, A.; Biskos, G.:
Scalable and Environmentally Benign Process for Smart Textile Nanofinishing
ACS APPLIED MATERIALS & INTERFACES. 8 (2016) 23, S. 14756–14765
- [GGY+22] Gong, W.; Guo, Y.; Yang, W.; Wu, Z.; Xing, R.; Liu, J.; Wei, W.; Zhou, J.; Guo,
Y.; Li, K.; Hou, C.; Li, Y.; Zhang, Q.; Dickey, M. D.; Wang, H.:
Scalable and Reconfigurable Green Electronic Textiles with Personalized Comfort Management
ACS Nano. 16 (2022) 8, S. 12635–12644
- [Gon23] Goncu-Berk, G.:
3D Printing of Conductive Flexible Filaments for E-Textile Applications
IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 1266 (2023) 1, S. 12001
- [HBN+23] Hirman, M.; Benešová, A.; Navrátil, J.; Steiner, F.; Tupa, J.:
New Recycling Procedure of SMD Components for Reuse in E-Textiles in Accordance to the
Green Deal Policy, 2023
- [HHY19] Hong, H.; Hu, J.; Yan, X.:
UV Curable Conductive Ink for the Fabrication of Textile-Based Conductive Circuits and
Wearable UHF RFID Tags
ACS APPLIED MATERIALS & INTERFACES. 11 (2019) 30, S. 27318–27326
- [Ing19] Inga Gehrke, Volker Lutz, David Schmelzeisen, Vadim Tenner and Thomas Gries:
Smart Textiles Production: MDPI, 2019
- [KGK22] Kang, D. J.; González-García, L.; Kraus, T.:
Soft electronics by inkjet printing metal inks on porous substrates
Flexible and Printed Electronics. 7 (2022) 3, S. 33001
- [MHG20] Micus, S.; Haupt, M.; Gresser, G. T.:
Soldering Electronics to Smart Textiles by Pulsed Nd:YAG Laser
Materials (Basel, Switzerland). 13 (2020) 11
- [WD20] Wu, S.; Devendorf, L.:
Unfabricate: Designing Smart Textiles for Disassembly
Bernhaupt, R.:
Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Honolulu
HI USA, 25 04 2020 30 04 2020
New York, NY, United States: Association for Computing Machinery, 2020, S. 1–14
- [XW19] Xiao, Y.; Watson, M.:
Guidance on Conducting a Systematic Literature Review
Journal of Planning Education and Research. 39 (2019) 1, S. 93–112