

## Zusammenfassung zum Schlussbericht

### Robuste Dünnschichtsensoren zur Inprozesskontrolle und -steuerung kritischer Prozessparameter bei der Kunststoffverarbeitung (RobInPro)

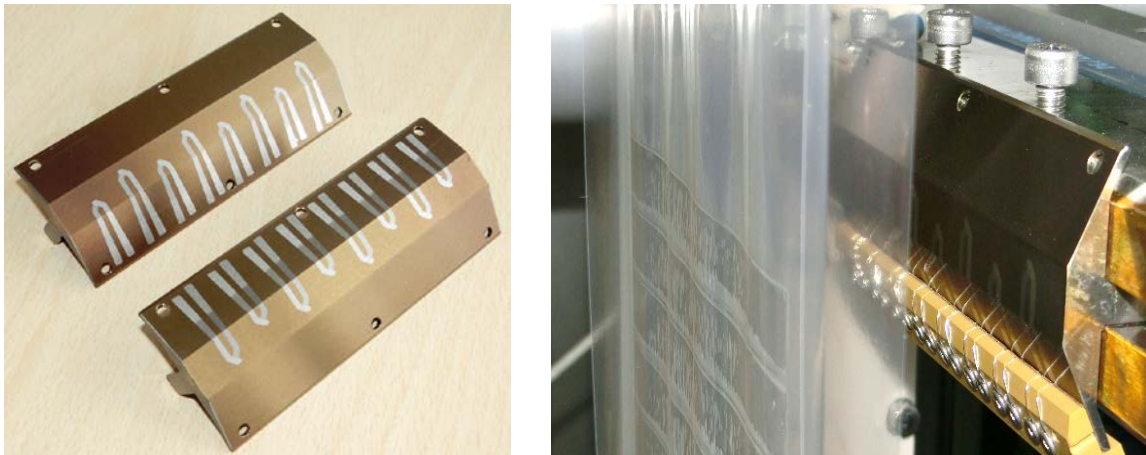
---

Beim Wärmekontaktfügen von Kunststofffolien schmelzen beheizte Werkzeuge die Folien oder deren Siegelschicht unter Druck auf und verbinden sie stoffschlüssig. Die Temperaturmessung und -regelung basiert dabei fast ausschließlich auf Widerstandsthermometern oder gekapselten Thermoelementen, die die Temperatur integral und oft vergleichsweise weit entfernt von der Werkzeugoberfläche messen. Dies führt vor allem bei schnelllaufenden Prozessen dazu, dass die hohen Anforderungen an Qualität, Produktsicherheit und Prozessstabilität nicht mehr erfüllt werden können. Der Trend hin zu niedrigkomplexen (Monofolien), rezyklathaltigen und faserbasierten Materialien verstärkt diesen Aspekt.

Neuartige Werkzeuge mit Dünnschichtthermoelementen auf der Oberfläche gestatten nun eine hochdynamische, sensitive und orts aufgelöste Temperaturmessung. Damit steht in Kombination mit einer innovativen Beheizung, z.B. mittels keramischer Heizelemente, eine echtzeitnahe Regelung der Prozessparameter in Aussicht. Doch bereits jetzt lassen sich die Temperaturverhältnisse einschließlich ihrer reglungsbedingten Schwankungen nur eine Foliendicke von der Fügezone entfernt erfassen. Damit können die Prozessparameter exakter geregelt, Nahtinhomogenitäten und Störungen, wie Falten oder Kontaminationen, anhand der Temperaturverläufe identifiziert und so eine 100% - Inlinequalitätsprüfung realisiert werden. Ausschuss und Ressourcenverbrauch lassen sich dadurch auf ein Minimum reduzieren.

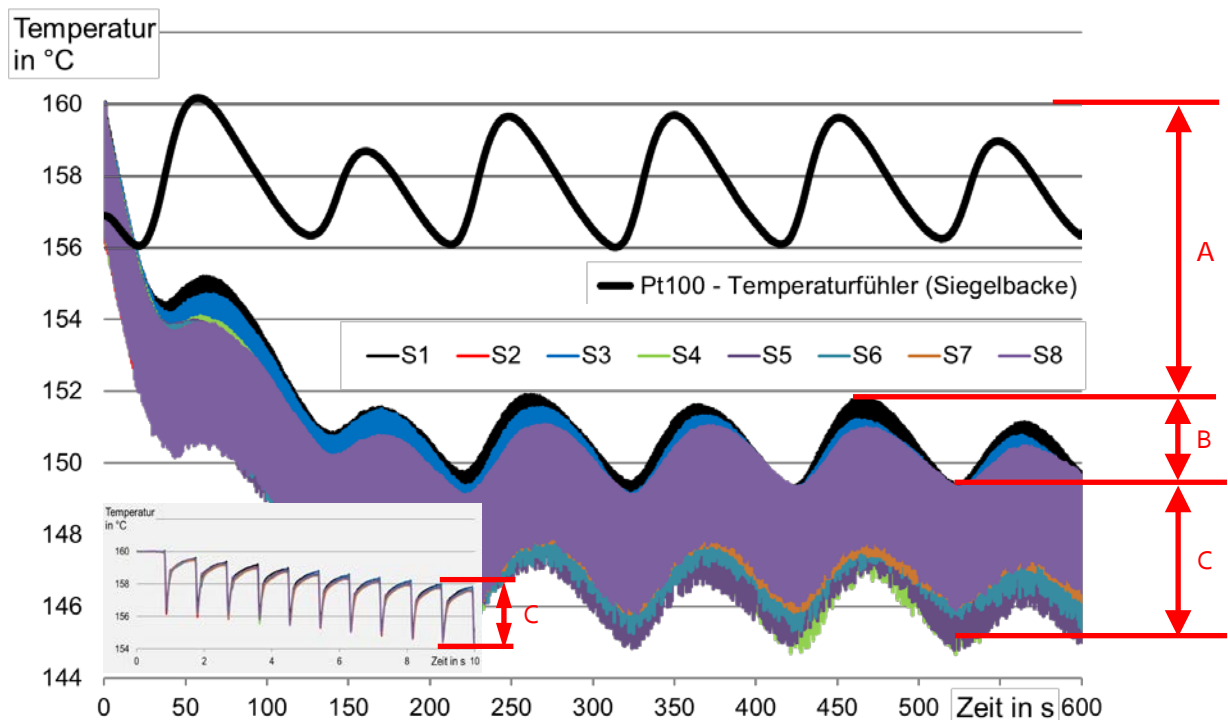
Aufbauend auf dem Proof-Of-Concept und dem aufgedeckten F&E-Bedarf im IGF-Vorhaben »HePhaiStOs« (18470 BG) stand im vorliegenden Projekt die Erhöhung der Standzeit der Werkzeugbeschichtung im Fokus der Entwicklung. Hierfür wurde der Multilagenaufbau überarbeitet und die Herausforderung der elektrischen Isolierung des meist metallischen Substrates gelöst. Weitere Schwerpunkte waren die hinreichend hohe Detektionsempfindlichkeit zur zuverlässigen Erkennung von Abweichungen sowie die Erarbeitung einer Methodik zur Bewertung der antiadhäsiven Wirkung potenzieller Schutzschichten.

Für die Untersuchungen stand final ein Werkzeugdemonstrator bestehend aus zwei Siegel-schienen mit je 8 Sensoren zur Verfügung, die über eine Kontaktierungsleiste mit einem Messverstärker verbunden waren (Abbildung 1).



**Abbildung 1** Werkzeugdemonstrator mit Thermoelement- und Schutzbeschichtung (l.); Demonstrator im Standzeitversuchsaufbau basierend auf dem Backenstuhl einer Schlauchbeutelmaschine (r.)

Der verwendete Versuchsaufbau nutzt den Backenstuhl einer Schlauchbeutelmaschine und dessen Temperaturregung, d.h. auch die klassische Temperaturmessung mit einem Widerstandsthermometer in der Siegelbacke, in der der Werkzeugdemonstrator integriert war. Das Messsignal dieses Pt100 gibt Abbildung 2 wieder, zeitsynchron ebenso den Temperaturverlauf der Dünnschichtthermoelemente S1 bis S8 an einer der Werkzeugoberflächen.

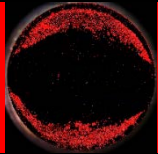

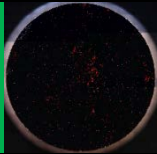

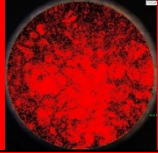
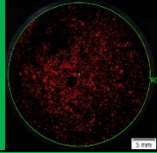
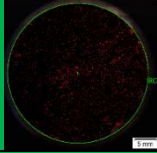
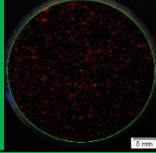
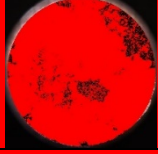

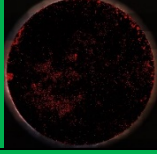







**Abbildung 2** Exemplarischer Temperaturmessschrieb nach Start des Versuchsstandes bei 160 °C @ 150 ms @ 2 MPa, 2x BOPET<sub>12</sub> / PE<sub>50</sub>: Aufzeichnung über 10 min (große Darstellung), Auszug über 10 s mit einzelnen Siegelzyklen (unter links)

Es wird deutlich, dass zwischen der eingestellten und im Stillstand vorherrschender Temperatur von 160 °C und der maximalen Werkzeugoberflächentemperatur im Betriebszustand im betrachteten Fall bis zu 8 K Temperaturdifferenz (A) liegen können. Hinzu kommen weitere reglungsbedingte 3 K (B). Der Temperaturabfall infolge des Wärmeabflusses in die Folie während des Fügeprozesses beträgt zudem bis zu 4 K (C). Im ungünstigsten Fall liegt also die tatsächliche Werkzeugoberflächentemperatur bei nur 145 °C. Bei Folien mit schmalen Prozessfenster und bei kurzen Zykluszeiten kann dies schnell zu Qualitätsmängeln führen. Wenngleich aus diesem Grunde die Solltemperatur heute üblicherweise deutlich höher eingestellt ist, wird dies z.B. bei künftigen Monomaterialverbunden zur Schädigung der Träger-schicht bzw. des Verbundes führen.

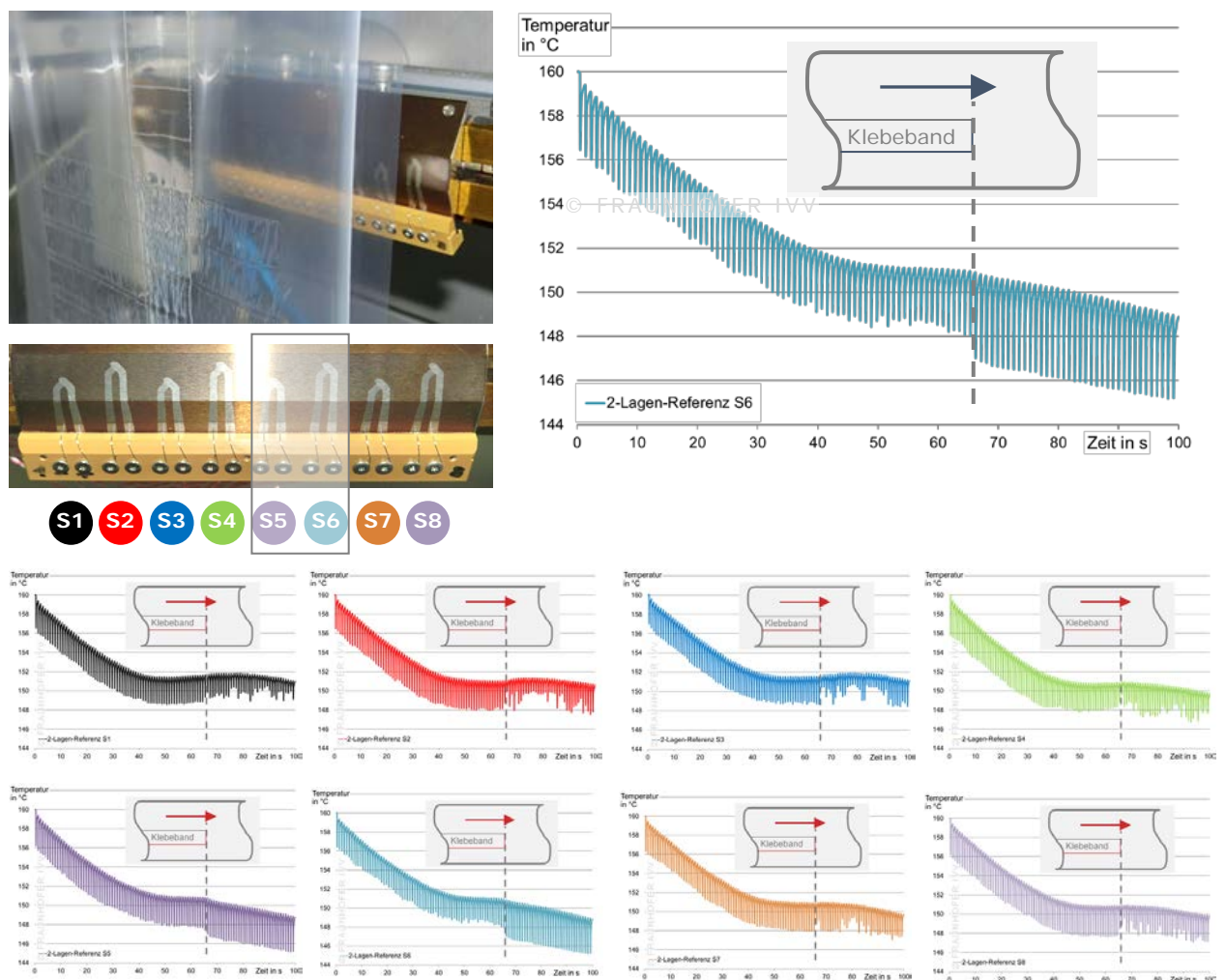
Neue, ökologischere Folienverbunde sind auch eine Herausforderung für bestehende Verarbeitungsanlagen, nicht zuletzt in Bezug auf das Anhaften der Folien am Werkzeug. Daher sind geeignete Beschichtungen nicht nur eine Notwendigkeit für den Schutz von Dünnschichtensensoren, sondern auch für Werkzeuge ohne Funktionalisierung von steigendem Interesse. Im Projekt wurden das Verhalten potentiell geeigneter – da bereits in anderen Branchen eingesetzt – Beschichtungen gegenüber dem Siegelmedium Polyethylen (LDPE, MFR 2) und den Produktkontaminationen Puderzucker und Milchpulver untersucht und mit dem der unbeschichteten polierten Edelstahloberfläche verglichen.

**Tabelle 1** Kontaminationsneigung untersuchter Oberflächen gegenüber verschiedenen Kontaminanten

	Edelstahl, poliert	Tegonit®TcC	Tegonit®TdS	Tegonit®TpT
Polyethylen 140°C, 2s, 1 MPa	 10 %	 < 1 %	 1 %	 < 1 %
Puderzucker 160°C, 2s, 1 MPa	 27 %	 2 %	 1 %	 1 %
Milchpulver ,grob' 120°C, 2s, 1 MPa	 93 %	 50 %	 5 %	 50 %
Milchpulver ,fein' 120°C, 2s, 1 MPa	 48 %	 26 %	 73 %	 42 %

Gemäß Tabelle 2 zeigen die Beschichtungen zunächst deutliche Vorteile, wenngleich Art und Partikelgröße der Kontaminanten sowie die Versuchsparameter einen entscheidenden Einfluss erwarten lassen. So konnten in Versuchen mit einem anderen Polyethylen z.B. kaum signifikante Unterschiede festgestellt werden. Es wird also auch künftig nicht die eine Beschichtung für alle Anwendungsfälle geben und eine Validierung für die jeweiligen Kontaktpartner erforderlich sein.

Dass sich mithilfe der entwickelten Technologie störende Einflüsse sicher detektieren lassen, verdeutlicht ein Experiment, bei dem ein Klebebandstreifen stellvertretend für eine Falte oder Kontamination in die Nahtzone einläuft (Abbildung 3).



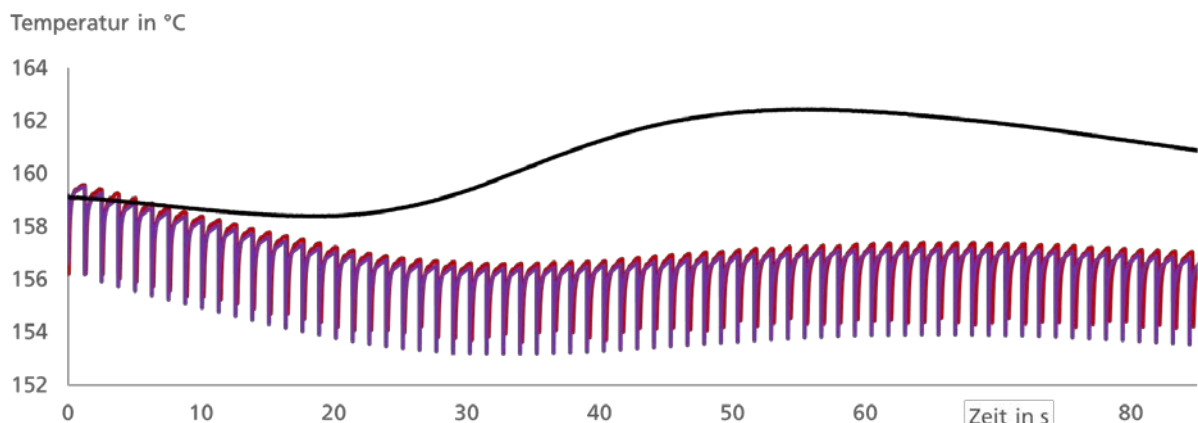
**Abbildung 3** Auswirkung zusätzlichen Materials in der Nahtzone auf den Temperaturverlauf, hier: 46  $\mu\text{m}$  dickes PP-basiertes Klebeband zwischen zwei BOPET<sub>12</sub> / PE<sub>50</sub> - Lagen im Bereich der Sensoren S5 und S6 des Demonstratorwerkzeuges bei 160 °C @ 150 ms @ 2 MPa

An den Sensoren S5 und S6 fällt mit dem Einlaufen des Klebebandstreifens die Temperatur während der Siegelzyklen stärker ab. Dabei spielen vor allem folgende Aspekte eine wesentliche Rolle:

- Der lokal höhere Druck im Bereich des Klebebandes verbessert die Kontaktverhältnisse und damit den Wärmeübergang in die Folie. Darüber hinaus wirkt das Klebeband wie ein Abstandshalter, weshalb an den übrigen Sensoren der gegenteilige Effekt eintritt.
- Das zusätzliche Material des Klebebandes verstärkt den Wärmetransport aus dem Werkzeug, an dessen Oberflächen die Temperatur niedrigere Werte erreicht.
- Das Klebeband generiert einen zusätzlichen Wärmeübergangswiderstand, der zu einem geringeren Temperaturabfall beiträgt.

Trotz numerischer Unterstützung wird es aufgrund unbekannter thermischer Kennwerte notwendig bleiben, Referenztemperaturverläufe zu ermitteln, Toleranzen zu validieren und darüberhinausgehende Abweichungen als Initiator für Ausschleusung, individuelle Nachkontrolle oder idealerweise echtzeitnahe Parameteranpassung heranzuziehen.

Dennoch kann das validierte Simulationsmodell die maschinenseitig bedingten Schwankungen (Abbildung 4) sowie Störeinflüsse gut abbildet und bei der Systemauslegung hilfreich sein.



**Abbildung 4** Experimenteller (rot) und simulierter Temperaturverlauf (blau) bei 160°C, 2 MPa, 250 ms (jeweils zzgl. Werkzeugbewegungszeit!) unter Berücksichtigung der Temperaturerfassung am maschineninternen Pt 100 (schwarz)

Mit nahezu 1 Mio. Kontaktzyklen und der zuverlässigen Erkennung regelungsbedingter Temperaturschwankungen und provozierte Störungen konnten wesentliche Meilensteine zur Ertüchtigung der Technologie für den industriellen Einsatz erreicht werden. Insbesondere die reproduzierbare elektrische Isolation metallischer Oberflächen als auch der langzeitbeständige Multilagenaufbau liefern die Voraussetzung für die Verwirklichung weiterer Sensorprinzipie und die Funktionalisierung profilierter Werkzeuge in einem absehbaren Zeitraum. Die aktuelle Herausforderung für weiterführende F&E besteht in der Kontaktierung der nur wenige hundert Nanometer dünnen Leiterbahnen mit den einige hundert Mikrometer dicken Ausgleichsleitungen, die die Sensoren mit dem Messverstärker verbinden.

Von der Entwicklung adaptiver Prozesse, zu der sensorbeschichtete Fügwerkzeuge essenziell beitragen, profitieren Maschinen- und Anlagenbauer, die ihre Prozesse besser auf packmittel- und packungsseitige Anforderungen ausrichten und eine individualisierte Produktion mit kleiner Losgröße unterstützen können. Eine sensitive Temperaturreglung ist essentielle Voraussetzung für die Verarbeitung der aufgrund gesetzlicher Vorgaben geforderten Monomaterialverbunde. Sie weisen im Gegensatz zu bisherigen Verbunden ein deutlich schmaleres, mit gängigen Temperatursensoren kaum handhabbares Verarbeitungsfenster auf. Besonders für die Pharma- und Medizinproduktebranche und zunehmend auch im Lebensmittelbereich sind eine lückenlose Rückverfolgbarkeit von Produktionsdaten und eine Inlinequalitätskontrolle unverzichtbar. Für Anbieter von Sensor- und Auswertetechnik besteht aufgrund der großen Verbreitung des Wärmekontaktverfahrens ein hohes Marktpotenzial. Dünnschichtbasierte Sensoren sind aber auch bei der Produktion technischer Güter und für andere Verpackungsprozesse, wie das Thermoformen, sowie für andere thermische Fertigungsprozesse, z. B. Spritzgießen, Heißprägen oder Extrudieren, von großer Bedeutung. Hier garantiert eine exakte Werkzeugtemperierung die sichere Ausformung und eine hohe Oberflächengüte und steigert so Produktqualität und Prozesssicherheit.

IVLV-Mitglieder können den vollständigen Projektabschlussbericht auf unserer Homepage herunterladen. Hierzu ist nur eine Anmeldung in der Rubrik „[Meine IVLV](#)“ erforderlich. Nicht-Mitglieder können den Abschlussbericht bei der IVLV-Geschäftsstelle unter [office@ivlv.org](mailto:office@ivlv.org) anfordern.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



Das IGF-Vorhaben 20340 BG der Forschungsvereinigung Industrievereinigung für Lebensmitteltechnologie und Verpackung e. V. – IVLV, Giggenhauser Str. 35, 85354 Freising, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) und –entwicklung vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.