

Die ECT-Tomographie als Verfahren zur kontinuierlichen Inline-Überwachung der Homogenität von Klebstoffen und Vergussmassen

Dr. S. Voß, Dr. H. Kordy, Fraunhofer IFAM, Wiener Straße 12, 28359 Bremen, Germany

Klebung ist allgegenwärtig in unserem Alltag. Ob im Automobil, in Haushaltsgeräten oder im Smartphone - Klebstoffe werden in vielen Produkten verwendet. Daher ist es von großer Bedeutung, dass Klebeverbindungen zuverlässig und fehlerfrei sind. Leider können Klebungen derzeit nicht vollständig zerstörungsfrei geprüft werden. Daher ist es wichtig, Fehlermöglichkeiten in der Prozesskette auf ein Minimum zu reduzieren und den gesamten Klebprozess zu beherrschen. Eine konsequente Überwachung und Dokumentation aller Prozessschritte ist entscheidend für die Qualitätssicherung beim Kleben. Ein wichtiger Aspekt der Prozessbeherrschung ist die reproduzierbare Dosierung des Klebstoffs auf die zu fügenden Teile. Besonders bei der Verwendung von zweikomponentigen Klebstoffen spielt die Homogenität des Klebstoffes während der Applikation eine entscheidende Rolle. Eine homogene Mischung bedeutet in der Regel, dass der Klebstoff frei von Blasen ist und im richtigen Mischungsverhältnis vorliegt. Störungen der Homogenität können Abweichungen im Mischungsverhältnis, eine unzureichende Durchmischung der Komponenten oder das Eindringen von Gasblasen sein. Solche Störungen können die Qualität der Klebung stark beeinträchtigen und im Serienprozess zu erheblichen Schäden führen. Daher ist es dringend erforderlich, ein System zur frühzeitigen Erkennung solcher Störungen zu entwickeln. Aktuell fehlt jedoch eine serienreife Methode zur Inline-Überwachung der Homogenität des Klebstoffaustrags. Das Forschungsprojekt "Inline-DoseControl" hat zum Ziel, diese Lücke mithilfe der elektrischen Kapazitätstomografie zu schließen.

1 Einführung und Motivation

Die DIN 2304 legt fest, dass der Klebprozess gemäß der Sicherheitsklasse der umzusetzenden Klebung qualitätsgesichert durchgeführt werden muss [1]. Ein wichtiges Qualitätsmerkmal in der Klebstoffverarbeitung ist in diesem Zusammenhang die Homogenität des Klebstoffs. Es ist entscheidend, dass sichere und wirtschaftliche Klebprozesse in der Serienfertigung bereits während des Austrags von einkomponentigen (1K) oder zweikomponentigen (2K) Klebstoffen Störungen in der Homogenität detektieren können. Solche Störungen können beispielsweise sein:

- Blasen im Klebstoff
- Abweichungen vom definierten Mischungsverhältnis bei 2K-Klebstoffen
- eine nicht ausreichende Durchmischung der Klebstoff-Komponenten bei 2K-Klebstoffen

Werden diese Störungen nicht erkannt kann dies weitreichende Folgen haben. Bei der Applikation von 1K-Klebstoffen, 1K-Dichtstoffen und 1K-Vergussmassen kann eine im Dosierprozess ausgetragene Luftblase zu einer Unterdosierung, bis hin zu einer Unterbrechung der Raupe führen. Die Tragfähigkeit einer Klebeverbindung wäre in diesem Fall lokal stark eingeschränkt. In Dichtnähten bzw. Vergussprozessen kann die Dosierung einer Luftblase einen Feuchtigkeitseintritt ermöglichen und dadurch das Alterungsverhalten des geklebten Produkts stark negativ beeinflussen.

Bei den zunehmend eingesetzten 2K Klebstoffen und Vergussmassen sind Mischungsverhältnis und Mischungsgüte wichtige Qualitätsparameter. Der Zusammenhang zwischen Mischungsverhältnis und Klebstoffeigenschaften wird unter anderem im IGF-Vorhaben 16-559 „Einfluss der Dosier- und Mischtechnik auf das Eigenschaftsprofil von 2K Klebstoffen“ beschrieben [2]. Es wird ein Abfall der Zugfestigkeit bereits bei Abweichungen von 5% vom Soll-Mischungsverhältnis festgestellt. Untersuchungen haben gezeigt, dass es insbesondere zu Beginn und zum Ende der Dosierung zu Abweichungen im Mischungsverhältnis kommen kann [3]. Der Verschleiß von Dosieranlagen, Umwelteinflüsse, Chargenschwankungen der Komponenten bzgl. der Viskosität, Luftblasen im Liefergebilde, Undichtigkeiten der Anlage oder Bedienungsfehler sind weitere Ursache für Inhomogenitäten durch Abweichungen des Mischungsverhältnisses [4, 5]. Das Fehlen von Systemen zur Inline-Überwachung der Homogenität der Klebstoffmischung stellt derzeit eine große Hürde für den verstärkten Einsatz von 2K-Klebstoffen in der Serienproduktion dar. Den Anwendern im Bereich der Klebtechnik steht bisher keine geeignete Sensorik für eine ausreichende Qualitätssicherung des Austrags von 2K-Klebstoffen zur Verfügung. Die Notwendigkeit der Qualitätssicherung wird durch aktuelle Forschungsprojekte, wie das laufende Projekt „Eco-Quality“ (IGF-Nr.-19-391) unterstrichen [6]. Das Projekt beschäftigt sich primär mit einer Methodik der zerstörungsfreien Qualitätssicherung von Klebeverbindungen. Speziell geeigneten Technologien für die Inline-Überwachung des Dosierstranges fehlen aber bisher. Stand der Technik zur Messung des Dosier- und Applikationsprozesses sind im Wesentlichen die Ermittlung von Volumenströmen sowie das optische Erfassen von Raupengeometrien und der Raupenpositionierung [7]. Eine kontinuierliche Inline-Überwachung und Dokumentation der Mischungsgüte des Materialstroms, des Mischungsverhältnisses und der Homogenität existiert bislang noch nicht. Die aufgezeigte technisch und wirtschaftlich bedeutende Lücke im Stand der Technik kann durch Einsatz der elektrischen Kapazitätstomografie geschlossen werden.

2 Die elektrische Kapazitätstomografie

Die elektrische Kapazitätstomografie (ECT) ist ein bildgebendes Tomografie-Verfahren, welches eine nicht-invasive Analyse der Materialverteilung in einem Messquerschnitt ermöglicht. Es wird hauptsächlich in der industriellen Prozessanalyse für die Mischtechnik und Strömungsanalyse eingesetzt und wird bereits in verschiedenen Industriezweigen zur Überwachung von Mischungen verwendet, wie z.B. in der Getränkeindustrie, Kosmetikindustrie und Papierindustrie [8]. Der Einsatz von ECT im Anwendungsbereich der Klebtechnik ist jedoch neuartig.

Der Aufbau eines ECT-Systems besteht in der Regel aus einer Sensoreinheit, einer Messeinheit und einer entsprechenden Software (Bild 1). Die Sensoreinheit ist röhrenförmig und kann beispielsweise in die klebstoffführenden Rohre einer Dosieranlage integriert werden. Im Projekt InlineDoseControl wurde eine Sensoreinheit mit einem Innendurchmesser von 14 mm und einer Gesamtlänge von 125 mm verwendet. Die Messung erfolgt idealerweise nach dem Mischen des Klebstoffs und vor dem Auftragen. Die physikalische Messgröße, die gemessen wird, ist die Permittivität des Klebstoffs. Diese kann wirtschaftlich durch Kapazitätsmessungen bestimmt werden. Die Messungen werden von der Messeinheit durchgeführt und an einen PC übertragen. Die Auswertung der Kapazitätsmesswerte erfolgt anschließend mit einer geeigneten Softwarelösung.

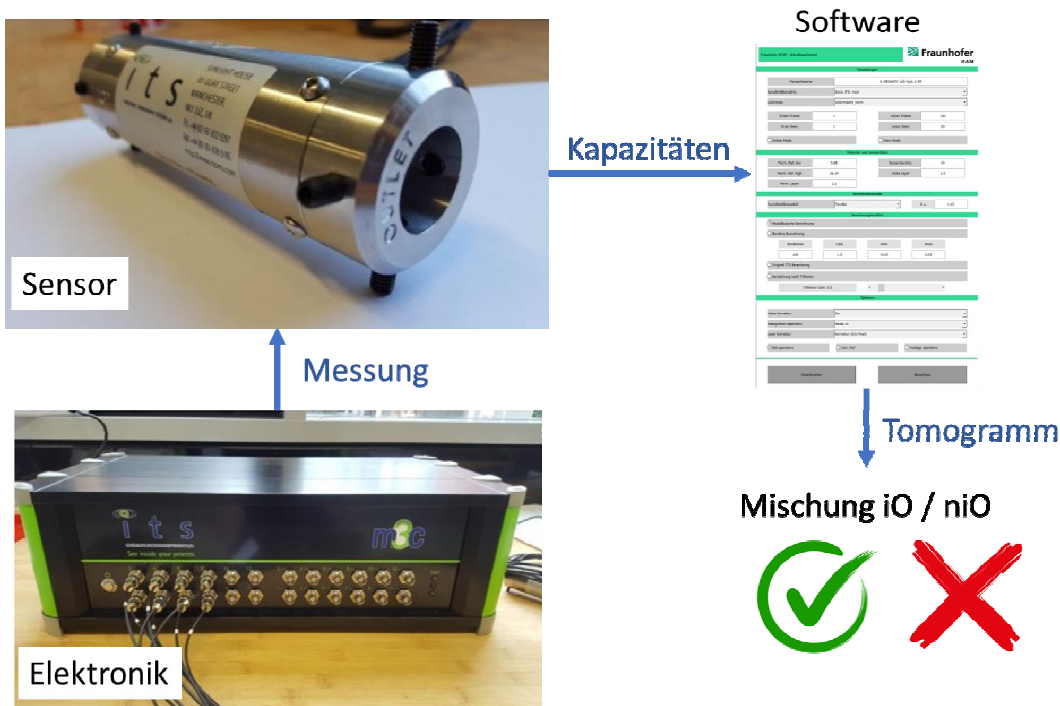
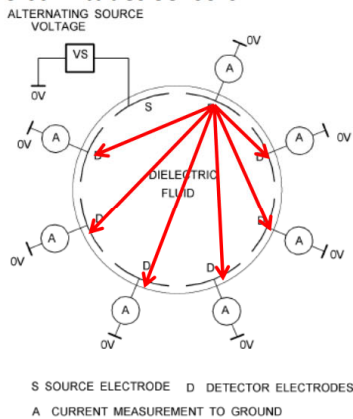


Bild 1. Schematische Darstellung eines ECT-Systems mit seinen Komponenten

Im Inneren der Sensoreinheit befinden sich 8 Elektroden, welche konzentrisch um die klebstoffführende Leitung angeordnet sind. Die Elektroden bilden zueinander Zwei-Platten-Kondensatoren deren Kapazität vom Klebstoffgemisch in der Sensoreinheit abhängt. Bild 2 zeigt einen Querschnitt durch die Sensoreinheit und visualisiert die Lage der Elektroden. Während einer Messung werden die Kapazitäten zwischen allen möglichen Elektrodenkombinationen gemessen. Das Ergebnis ist ein Datensatz aus 28 unabhängigen Kapazitäten, der sowohl eine Information über die Klebstoffmischung (Permittivität), als auch eine Ortsinformation (Lage der Elektroden) enthält. Aus diesen Informationen lässt sich die im Sensor befindliche Materialverteilung rekonstruieren. Diese Rekonstruktion wird in Form eines Tomogramms bestehend aus 812 Pixeln ausgegeben. Jedem Pixel ist ein normiertes Mischungsverhältnis zugeordnet. Der arithmetische Mittelwert aller Pixel repräsentiert das Mischungsverhältnis, welches zum Zeitpunkt der Messung im Sensor vorgeherrscht hat. Die Streuung der einzelnen Pixelwert zum arithmetischen Mittel ist ein Maß für die Mischungsgüte. Eine beispielhafte Auswertung ist in Bild 2 rechts dargestellt, wobei der gemessene Wert der Permittivität oben rot hervorgehoben und der aktuelle Harzgehalt unten angegeben ist.

Querschnitt des Sensors



Rekonstruktion
mittels
Software

22_05_11_A-B_80Grad.csv
Modellbasierte Berechnung

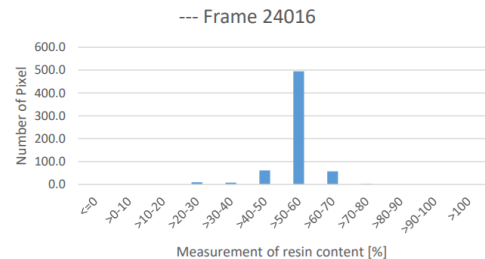
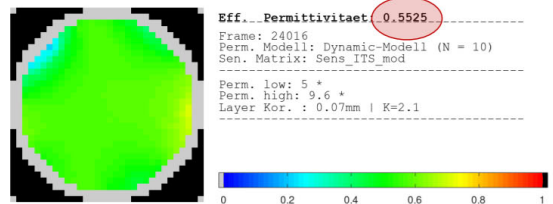


Bild 2. Prinzip einer ECT-Messung

Im Projekt InlineDoseControl wird gezeigt, dass eine kommerzielle Standard-ECT den Anforderungen der Klebtechnik nicht genügt. Kern des Projektes war daher die gezielte Modifikation einer kommerziellen ECT für den Einsatz mit Klebstoffen. Diese Modifikationen betreffen insbesondere spezielle Algorithmen zur Auswertung der Messungen und ein Konzept zum Schutz der Sensorik vor reaktiven Klebstoffen. Die Leistungsfähigkeit dieser angepassten ECT wurde im Labor und Praxisversuch nachgewiesen.

3 Detektion des Mischungsverhältnisses im Laborversuch

Zur Demonstration der Leistungsfähigkeit der angepassten ECT in Bezug auf die Detektion unterschiedlicher Mischungsverhältnisse wurde ein Laborversuch durchgeführt, dessen Versuchsaufbau in Bild 3 aufgezeigt ist.

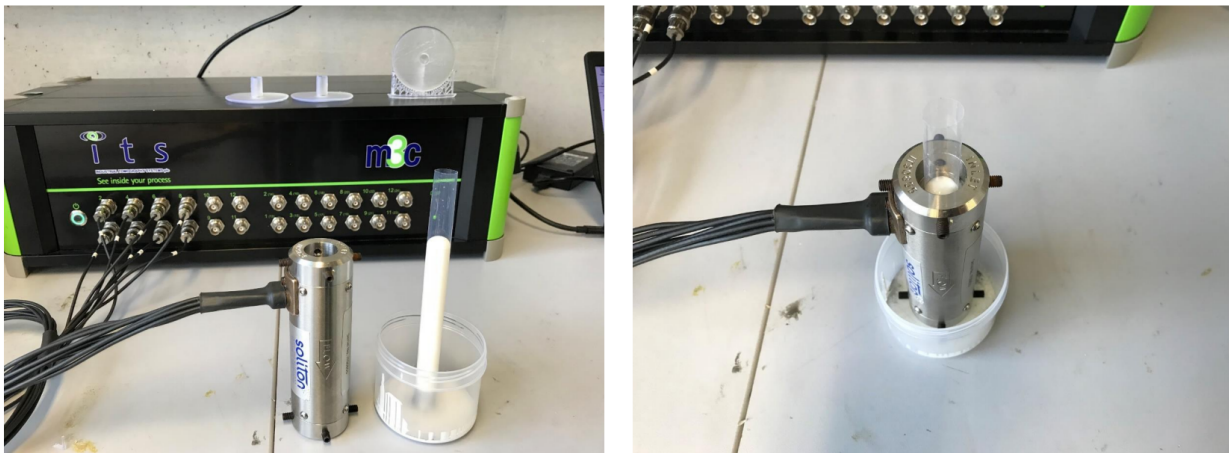


Bild 3. Versuchsaufbau zur Detektion unterschiedlicher Mischungsverhältnisse im Laborversuch mittels angepasster ECT

Für die in Bild 3 exemplarisch gezeigte Versuchsserie wurde ein weißlicher 2K-Epoxidklebstoff mit einem Soll-Härteranteil von 22,5 % verwendet. Insgesamt wurden zehn homogene Klebstoffmischungen mit jeweils unterschiedlichen Härter-Anteilen, variierend von 15% bis 30%, hergestellt. Diese Mischungen wurden zur besseren Handhabung im Anschluss blasenfrei in Musterröhrchen gefüllt. Um die blasenfreie Füllung sicherzustellen wurde ein eigens hierfür konstruierter Adapter verwendet, welcher es ermöglicht, die Musterröhrchen direkt aus Speedmischerbecher zu füllen. Die auf diese Art gefüllten Musterröhrchen wurden in den ECT-Sensor eingebracht und der Härteranteil mittels ECT-Messung bestimmt.

Die Messergebnisse sind in Bild 4 in Form einer Gegenüberstellung des gemessenen mit dem eingestellten Härteranteil gezeigt. Die schwarze Linie gibt den Idealfall wieder, bei welchem der gemessene mit dem eingestellten Härteranteil exakt übereinstimmt. Zur besseren Einordnung ist eine Abweichung von $\pm 5\%$ (gestrichelte Linie) angegeben. Eine Detektion des Mischungsverhältnisses mittels angepasster ECT war erfolgreich, wobei die mittlere Abweichung von der Sollvorgabe 1,7% betrug bei einer maximalen Abweichung von 3,4%.

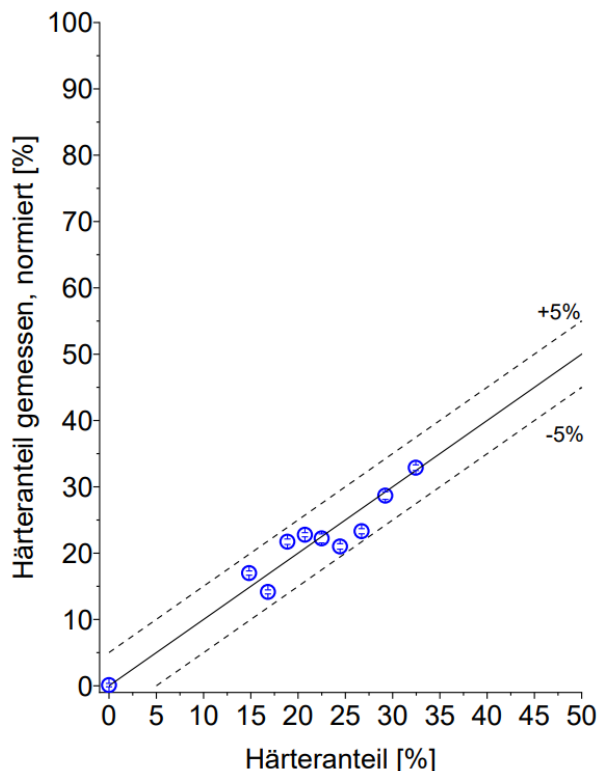


Bild 4. Ergebnis der Detektion unterschiedlicher Mischungsverhältnisse im Laborversuch mittels angepasster ECT

4 Detektion der Homogenität im Laborversuch

Ein großer Vorteil der ECT besteht darin, Inhomogenitäten (wie beispielsweise Luftblasen) detektieren und visualisieren zu können. Zum experimentellen Nachweis wurden hierfür in einem 1K-Klebstoff definiert Luftblasen in Form von Styroporkugeln eingebracht, da die Permittivität von Styropor mit der von Luft (~ 1) vergleichbar ist. In Bild 5 sind links rötliche Styroporkugeln unterschiedlicher Durchmesser (1,5 mm bis 10 mm) gezeigt sowie rechts beispielhaft eine 4 mm Styroporkugel in einem mit Klebstoff gefüllten Musterröhrchen.



Bild 5. Experimentelle Abbildung einer Luftblase mittels Styroporkugeln unterschiedlicher Durchmesser (1,5 - 10 mm)

Für die in Bild 6 gezeigten Messergebnisse wurde die Styroporkugel im unteren Bereich des Musterröhrchens eingebracht. Im Experiment steigt die Kugel anschließend langsam und stetig auf und passiert die Detektionsebene des Sensors. Die gemessenen Tomogramme der aufsteigenden Kugel (Bild 6, A-J) stellen den Klebstoff in rot und die detektierte Luftblase in blau dar.

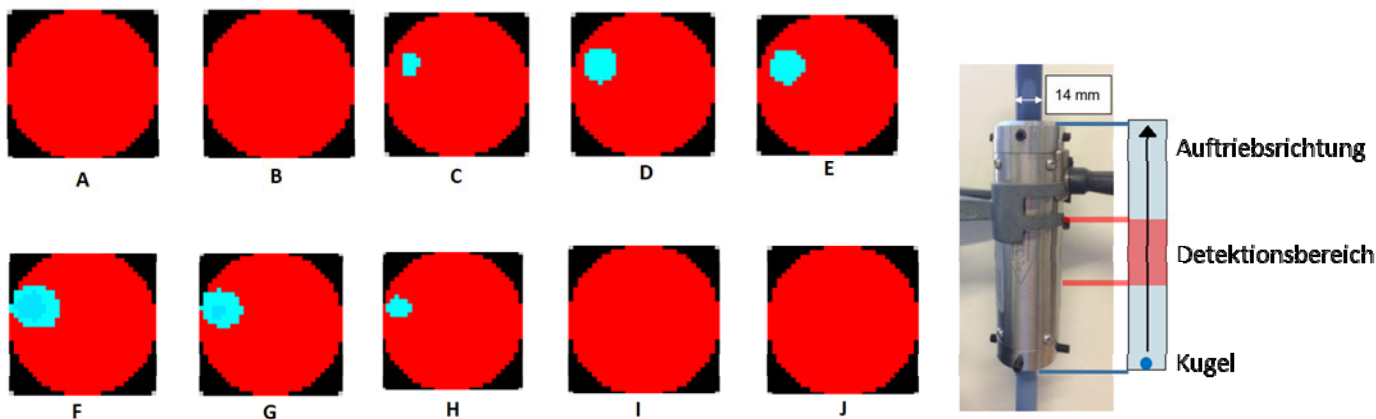


Bild 6. Detektion einer Luftblase mit 4 mm Durchmesser mittels angepasster ECT sowie schematischer Darstellung des Versuchsaufbaus

Die Versuche zur Detektion von Inhomogenitäten verliefen erfolgreich. Es konnten alle Luftblasen, einschließlich der kleinsten Luftblase mit einem Durchmesser von 1,5 mm erfolgreich detektiert werden. Die Ergebnisse lassen zudem den Schluss zu, dass auch kleiner Luftblasen anhand der Messdaten detektierbar sind, obgleich diese visuell im Tomogramm nicht zu erkennen sind.

5 Erprobung der ECT im Praxisversuch

Im Rahmen des Projektes konnten nicht alle relevanten Parameter, wie beispielsweise das Sensorverhalten bei strömendem Klebstoff oder ein möglicher Temperatureinfluss auf die Messung, im Laborversuch ermittelt werden. Daher wurden ergänzende Praxisversuche an einer Muster-Dosieranlage der Schuhindustrie mit einem branchenüblichen 2K-Polyurethan durchgeführt. Der Sensor wurde am Ausgang der Mischkammer anstelle der Spritzgussform für Schuhsohlen montiert und mit praxisnahen Prozessparametern getestet. Bild 7 zeigt die mit ECT-Technologie ausgerüstete Muster-Dosieranlage.



Bild 7. Musterdosieranlage mit montiertem ECT-Sensor

Die Ergebnisse verschiedener Mischungsverhältnisse an der Muster-Dosieranlage sind in Bild 8 gezeigt. Die eingestellte Soll-Vorgabe des Harzanteils wurde zwischen 43 % und 56 % variiert und das ausgetragene Mischungsverhältnis entsprechend via ECT gemessen. Zusammenfassend konnte das Mischungsverhältnis im Versuch mit einem Toleranzbereich < 2,5 % bestimmt werden. Die Versuche an der Muster-Dosieranlage demonstrieren, dass die ECT auch unter praxisnahen Bedingungen und bei Klebstoffdurchfluss funktioniert.

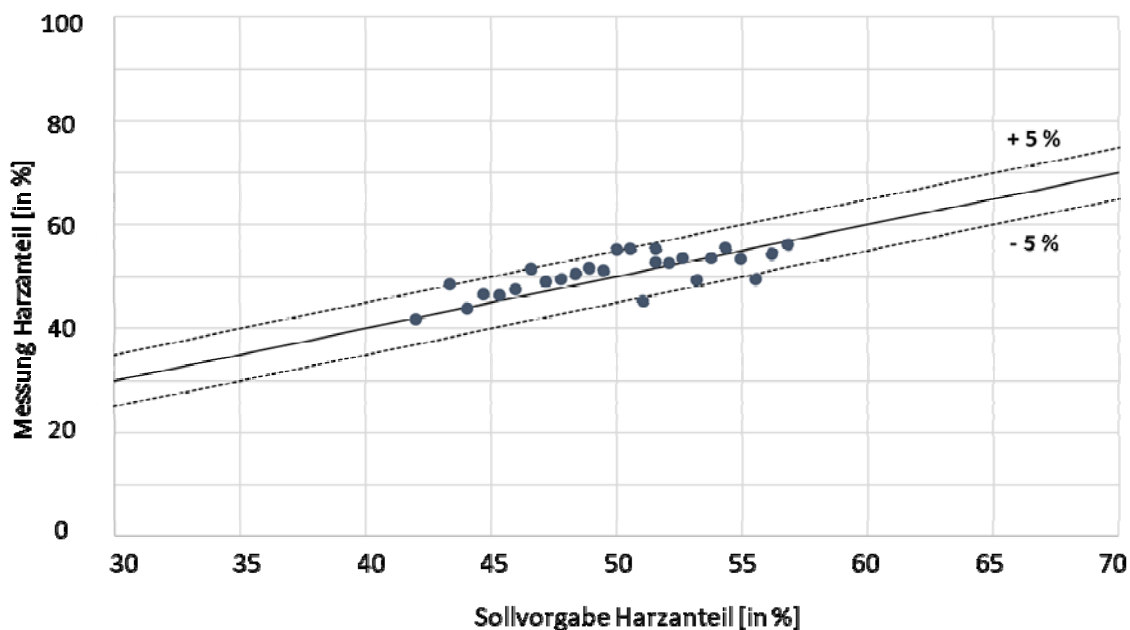


Bild 8. Detektion einer Luftblase mit 4 mm Durchmesser mittels ECT

6 Aufbau eines Technologie-Versuchsstandes

Zum Abschluss des Projektes wurden alle generierten Erkenntnisse bezüglich angepasster ECT-Messungen in einen Technologie-Versuchsstand überführt, welcher in enger Zusammenarbeit mit dem projektbegleitenden Ausschuss entwickelt wurde. Dieser ermöglicht die unabhängige Dosierung von zwei Klebstoffkomponenten aus Euro-Kartuschen. Angetrieben wird die Anlage zweier Drehstrommotore, welche jeweils mittels Spindeltrieb einen Kolben bewegen und somit den Klebstoff aus der Euro-Kartusche fördern. Die Kartuschen an sich sind mit einem Stützrohr zwecks Erhöhung der Stabilität ausgestattet. Im Betrieb werden die erzeugten Volumenströme über einen Messing-Adapter voneinander getrennt und anschließend in einen Statikmischer eingeleitet. Am Ende des Statikmischers ist der ECT-Sensor mit integriertem Schutz des Sensors vor Verschmutzungen (Liner) montiert. Die Software zur ECT-Messung befindet sich auf einem separaten Rechner. (Bild 9)

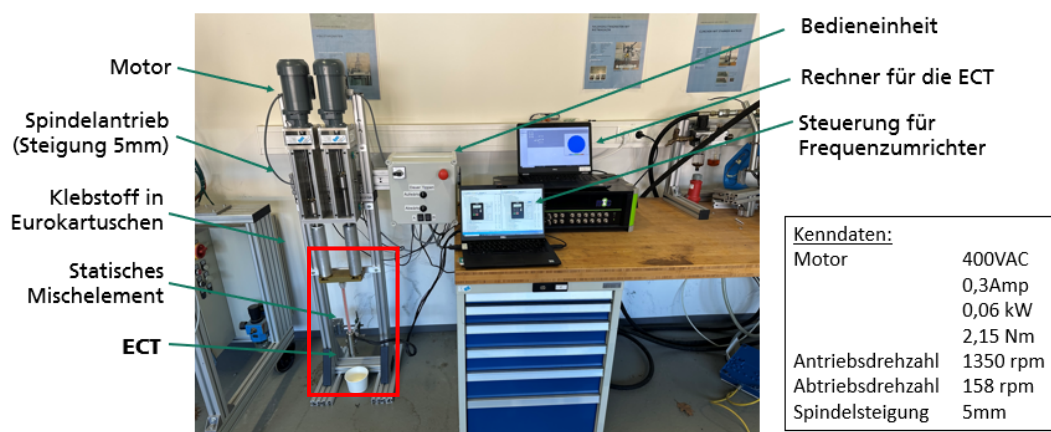


Bild 9. Aufbau des Technologie-Versuchsstandes mit integrierter ECT sowie Detailansicht

Der Technologie-Versuchsstand wurde abschließend in verschiedenen anwendungsnahen Szenarien geprüft, wobei die Eignung der ECT speziell für diese Szenarien nachgewiesen werden konnte. Folgende Szenarien wurden hierbei betrachtet:

- Einfahren einer neuen Dosieranlage
- Überwachung des Startverhaltens einer Dosieranlage und die inline Detektion von Dosierfehlern
- Detektion von Änderungen im Mischungsverhältnis im Betrieb
- Nachverfolgung instationärer Zustände

Beispielhaft ist in Bild 10 die inline-Detektion verschiedener Dosierfehler gezeigt. Zu Beginn der Dosierung wurde ein kurzzeitiger instationärer Zustand in Form einer kurzzeitigen Überdosierung des Härterers registriert, bis das voreingestellte Soll-Mischungsverhältnis erreicht wurde. Im weiteren Verlauf des Versuches kam es zu einer Verkipfung der Härter-Kartusche, was zu einem Austritt des Härterers auf der Kartuschen-Rückseite und zu einer Reduzierung des gemessenen Härteranteils führte. Diese Fehldosierung aufgrund des Härter-Mangels wurde unmittelbar mit Hilfe der ECT detektiert, die Anlage daraufhin gestoppt und die Kartusche neu positioniert. Im weiteren Verlauf wurde erneut das Soll-Mischungsverhältnis erreicht, bis kurz vor Ende des Dosiervorganges kein Härter mehr vorhanden war und der gemessene Härteranteil entsprechend abfiel.

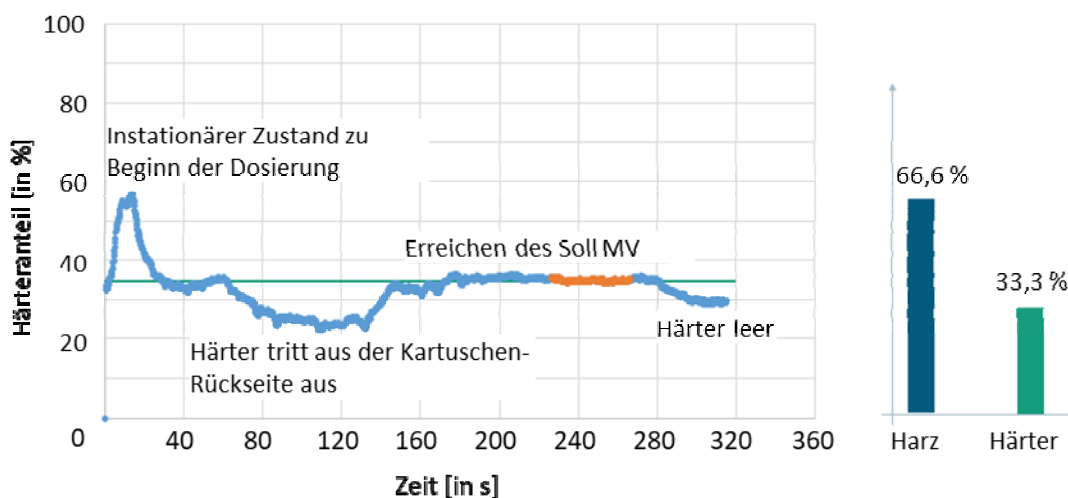


Bild 10. Detektion verschiedener Mischfehlern mittels ECT

7 Fazit und Ausblick

Das Projekt InlineDoseControl zeigt, dass die inline-Prozesskontrolle der Homogenität von Klebstoffen mittels elektrischer Kapazitätstomografie bereits heute realisiert werden kann. Dies ermöglicht die Überwachung und Dokumentation des Mischungsverhältnisses und der Mischungsgüte von Klebstoffen in Echtzeit und stellt einen deutlichen Fortschritt in der Qualitätssicherung dar. Die Sicherheit von Klebprozessen wird dadurch erhöht. Zudem ergeben sich neue Möglichkeiten zur Verbesserung von Klebtechnik-Anlagen für Anwender und Dosieranlagenhersteller. Im Fokus der Forschung steht die Entwicklung einer selbstüberwachenden und selbstregulierenden Dosieranlage für mehrkomponentige Klebstoffsysteme als Langzeitziel.

Literatur

- [1] DIN 2304-1:2016-03 . Klebtechnik - Qualitätsanforderungen an Klebprozesse. s.l. : Beuth Verlag, 2016.
- [2] IFG 16.559 Einfluss der Dosier- und Mischtechnik auf das Eigenschaftsprofil von 2K Klebstoffen. Paderborn : s.n., 2012.
- [3] Prof. Dr.-Ing. Dilger, K. und Dr. Fricke, H. Methoden zur Abschätzung des Verschleißes von Dosieranlagen bei der Verarbeitung von höherviskosen gefüllten Klebstoffen – Abrasio. Braunschweig, Bremen : IGF-Vorhaben Nr. 18155N, 03/2017

- [4] Laubscher, F. Einsatz von 2K-Klebstoffen in der modernen Produktion – Perfekt gemischt zur richtigen Zeit am richtigen Ort. Adhäsion - Kleben und Dichten. 2010, 5/2010
- [5] Niermann, D., et al. Qualitätssicherung in der Klebtechnik (Teil 1): Konstruktionsphase. Adhäsion - Kleben und Dichten. 2015, 7-8/2015.
- [6] DVS Forschungsvereinigung, Band: 429 - IGF-Nr.: 19.391N / Methoden zur zerstörungsfreien prozessintegrierten Qualitätssicherung elementar geklebter Strukturen
- [7] Prof. Dr.-Ing Dilger, K., Dr. rer. nat Fischer, F. und Dipl.-Ing Schönteich, B. IGF 16.384N - Berührungslose thermische Durchflussmessverfahren zum geregelten Klebstoff-auftrag hochviskoser Klebstoffe.
- [8] ITS Plc. Applications - Inline Mixing. [Online] Industrial Tomography Systems. [Zitat vom: 29.03.2018] <https://www.itoms.com/applications/inline-mixing/>.

Das IGF-Vorhaben Nummer 21.544 N/DVS-Nummer 08.3339 der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS, Aachener Straße 172, 40223 Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz