Reduktion des Fadenzugs bei der Dosierung hochviskoser Klebstoffe – Ursachen verstehen und vermeiden

Hochviskose Klebstoffe neigen bei der industriellen Applikation zum Fadenzug. Ursachlich hierfür sind die Fließeigenschaften dieser Klebstoffe. Der Fadenzug führt zum Einsatz von Reinigungsgeräten, zur Verschmutzung von Bauteilen oder zur Verschleppung von Klebstoff. Folgen sind erhöhter Verbrauch des Klebstoffs, anfallender Sondermüll, Nacharbeiten, Reinigung und Umweltbelastung. Materialwissenschaftliche Methoden zur Charakterisierung der Fadenzugneigung von Klebstoffen waren bisher in ihrer Prognosekraft eingeschränkt. Maschinenbauliche Maßnahmen zur Verringerung der Fadenzugneigung wurden bisher nicht systematisch untersucht. Ziel des hier vorgestellten Forschungsprojekts "Fadenfrei" war ein verbessertes Verständnis der Ursachen des Fadenzugs und die Entwicklung von Düsen, die den Fadenabriss aktiv unterstützen. Mit Hilfe von Strömungssimulationen wurde der Fadenabriss quantifiziert und die Voraussage der Fadenzugneigung verbessert. Auf Grundlage der Untersuchungen wurden Düsen entwickelt, die jetzt als vorwettbewerbliche Konzepte den Anwendern zur Verfügung stehen.

1 Einleitung

Aufgrund ihrer viskoelastischen Fließeigenschaften besitzen industriell eingesetzte, hochviskose Klebstoffe intrinsisch eine Neigung zum Fadenzug. Dieser Fadenzug ist anschaulich durch Bild 1 illustriert. Fadenzug führt zu Verschmutzungen von Bauteilen, Anlagenkomponenten und Klebarbeitsflächen, die insbesondere bei automatischer Applikation den Ertrag des Wertschöpfungsprozesses mindern. Eine Verschmutzung der Applikationsanlage wächst sukzessive mit jedem Applikationsvorgang, bis der Fertigungsprozess zur Reinigung der Applikationsanlage unterbrochen werden muss. Wird die Reinigung der Anlage nicht rechtzeitig durchgeführt, ist die Produktqualität nicht gesichert. Eine besondere Gefahr ist die Verschleppung derartiger Verschmutzungen in angrenzende Bereiche, in nachgeschaltete Fertigungsstationen oder gar in die Sicht- oder Funktionsflächen des Produkts. Neben einer Reduktion der Produktqualität führen Verschmutzungen zu steigenden Kosten in der Produktion durch zusätzliches Reinigen oder Nacharbeiten. In einigen Bereichen verhindern sie sogar den Einsatz der Fügetechnik Kleben zugunsten technologisch ansonsten nachteiliger Fügeverfahren. Obwohl in der Industrie bereits umfangreiche Bestrebungen angestellt wurden, den Fadenzug bei der Verarbeitung von Klebstoffen zu vermeiden, sind bislang nur einzelne erfahrungsbasierte Regeln bekannt, mit denen der Fadenzug nicht prinzipiell vermieden, sondern nur eingeschränkt werden kann.

Klebstoffhersteller versuchen beispielsweise, die Neigung ihrer Produkte zum Fadenzug zu reduzieren oder zumindest deren Fadenzugneigung im technischen Datenblatt anzugeben. Bisher lagen jedoch kein vollständiges wissenschaftliches Verständnis der Ursache für den Fadenzug hochviskoser Klebstoffe und keine

DIE AUTOREN



Dr. Holger Fricke

Abteilungsleiter Klebtechnische Fertigung am Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM), Bremen holger.fricke@ifam.fraunhofer.de www.schweissenundschneiden.de/?id=202981



Prof. Dr. Bernd Mayer

Direktor am Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und angewandte Materialforschung (IFAM), Bremen bernd.mayer@ifam.fraunhofer.de www.schweissenundschneiden.de/?id=350212



Fabian Julius Fassbender, M. Sc.Sales Engineer, DYMAX Europe GmbH

ffassbender@dymax.com www.schweissenundschneiden.de/?id=400216



Dipl.-Chem. Elisabeth Stammen

Abteilungsleiterin Kleben und mechanisches Fügen am Institut für Füge- und Schweißtechnik (ifs) der Technischen Universität Braunschweig e.stammen@tu-braunschweig.de www.schweissenundschneiden.de/?id=289775



Dr.-Ing. Stephan Koch

Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Kleben und mechanisches Fügen am Institut für Füge- und Schweißtechnik der Technischen Universität Braunschweig s.koch@tu-braunschweig.de www.schweissenundschneiden.de/?id=400215



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. h. c. Klaus Dilger

Leiter des Instituts für Füge- und Schweißtechnik (ifs) der Technischen Universität Braunschweig

k.dilger@tu-braunschweig.de www.schweissenundschneiden.de/?id=200754

STICHWÖRTER

Kleben

universellen, standardisierten Methoden zur Quantifizierung dieses Verhaltens vor.

Auch die Hersteller von Dosieranlagen haben verschiedene maschinenbauliche Maßnahmen entwickelt,

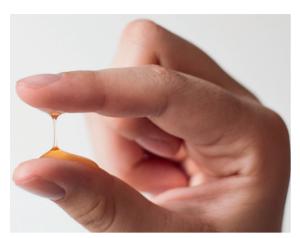


Bild 1 • Fadenzug viskoser Medien, veranschaulicht am Beispiel von Honig. (Quelle: Fraunhofer IFAM)

um Verschmutzungen durch den Fadenzug zu reduzieren. Diese Maßnahmen zielen beispielsweise darauf ab, das Materialvolumen des Fadens durch kurze Kapillardüsen gering zu halten, den Faden durch physikalische Einwirkungen gezielt abzureißen oder den Faden in Reinigungsvorrichtungen mit textilen Verbrauchsmaterialien abzuwischen. Die Auswahl der geeigneten Maßnahmen erfolgt klebstoff- und anwendungsspezifisch auf Basis empirischen Wissens der Unternehmen und unter Beachtung ökonomischer Bedingungen. Das erkannte Problem seitens der Wirtschaft lässt sich durch die im Projekt erarbeitete frei zugängliche dokumentierte Vorgehensweise für den Vergleich maschinenbaulicher Maßnahmen gegen Verschmutzungen durch Fadenzug sowie die Durchführung vergleichender Materialcharakterisierung beheben.

Ziel des Forschungsprojekts "Fadenfrei" war es daher, die Lücke in der Erkenntnis der Entstehung des Fadenzugs zu schließen sowie maschinenbauliche Maßnahmen zur Reduktion des Fadenzugs zu generieren. Basierend auf den materialwissenschaftlichen Erkenntnissen zur Fadenbildung und ergänzt durch eine Bewertung maschinenbaulicher Maßnahmen sollten die durch Fadenzug hervorgerufenen, unerwünschten Verschmutzungen, aufbauend auf den im Folgenden zusammengestellten Ergebnissen, gezielt vermieden werden.

2 Stand der Technik

2.1 Materialwissenschaftlicher Stand

Industrielle Klebstoffe werden für sehr unterschiedliche Fügeaufgaben eingesetzt. Die für eine spezifische Anwendung angepasste Formulierung eines industriellen Klebstoffs ist durch die Selektion von passenden Grundstoffen und Füllstoffen aus einer enorm großen Gesamtheit möglich. Ebenso wie die Endeigenschaften variiert aber auch das rheologische Verhalten von Klebstoffen stark. Grundlage der physikalischen Beschreibung der Rheologie materieller Stoffe sind die konstitutiven Gleichungen. Die einfachsten Gleichungen beschreiben den idealen elastischen Festkörper und die ideale viskose Flüssigkeit [1]. Industrielle Klebstoffe weisen in der Regel sowohl elastische als auch viskose Eigenschaften auf und werden als viskoelastische Fluide bezeichnet. In der automatisierten Klebstoffapplikation treten komplexere Strömungsformen als die reine Scherströmung auf [2]. Beim Fadenzug kommt es neben der Scherbeanspruchung auch zur Dehnbeanspruchung des Klebstoffs.

ABSTRACT

Reduction of thread tension when dosing highly viscous adhesives – understand and avoid causes

Highly viscous adhesives tend to pull threads during industrial application due to the flow properties of these adhesives. This results in use of cleaning equipment, soiling of components or carry-over of adhesives. The consequences are increased adhesive consumption, hazardous waste, reworking, cleaning and environmental pollution. Materials science methods for characterizing the tendency of adhesives to pull threads have so far been limited in their predictive power. Engineering measures to reduce the tendency of thread tension have not yet been systematically investigated. The aim of the research project "Fadenfrei" presented here was an improved understanding

of the causes of thread tension and the development of nozzles which actively support thread breakage. Flow simulations were used to quantify the thread breakage and improve the prediction of the thread tensile strength. Based on the investigations, nozzles were developed which are now available as pre-competitive concepts to users.

KEYWORDS

adhesive bonding

Stand der Technik ist die Bewertung der Fadenzugneigung des Klebstoffs auf Basis der Scherrheologie: Nach [3] kann hierzu das Verhältnis von viskosem zu elastischem Modul genutzt werden. Der Verlustwinkel (tan (δ)) wird dazu durch die Oszillationsrheometrie bestimmt. Nach [4] ist auf Basis von Messungen am oszillierenden Rotationsrheometer ein Strukturquotient definiert, der die Neigung der Fadenzugbildung vorhersagt, **Formel 1**.

$$S(G') = \frac{G'(Deformation=0.001)}{G'(Deformation=0.1)} (1)$$

Dabei beschreibt ein Strukturquotient S > 30 einen geringen Fadenzug, S $\cong 20$ einen mittleren und S ≤ 12 einen starken Fadenzug. Nach [5] ist die Fadenzugneigung über die oberen und unteren Plateaubereiche sowie die Steigung des Verlustwinkels als Funktion der Scherdeformation charakterisiert. Je stärker die Steigung der Phasenverschiebung, desto größer ist auch die Neigung der Fadenbildung. Für die Charakterisierung der Plateaubereiche werden Klebstoffe, deren unteres Plateau einen Verlustwinkel $\delta > 16^\circ$ aufweist, als stark fadenziehend eingestuft.

2.2 Maschinenbaulicher Stand

Aktuell verfügbare kommerzielle Systeme zur Reduzierung des Fadenzugs während der Klebstoffapplikation verhindern durch Rückhalteeffekte ein Nachfließen des Klebstoffs. Beispielsweise fährt bei dem so genannten "Snuff-Back"-Dosierventil die Ventilnadel zum Schließen entgegen der Klebstoff-Flussrichtung zurück, wodurch ein Rücksog entsteht [6; 7]. Durch diesen Rücksaugeffekt wird ein Nachtropfen vor allem von niederviskosen Medien verhindert. Andere Konzepte arbeiten hierzu lediglich, aber vergleichbar effektiv, mit einem Rückhaltevakuum.

Schmelzklebstoffe ohne Fließgrenze und mit einer oft starken Neigung zum Fadenzug sowie zur Bildung von sogenanntem "Engelshaar" werden industriell mit Düsen mit Rückschlagventilen appliziert. Ergänzend hierzu sind Patente bekannt, in denen ein Abtrennen des Schmelzklebstofffadens hinter der Applikationsdüse mit einem Schneidfaden, mit Wärme, Strahlung, Druckluft oder Wasserdampf vorgeschlagen wird [8...11].

3 Material und Methoden

3.1 Materialwissenschaftliche Methoden

Betrachtet wird die Fadenzugneigung von mittel- bis hochviskosen Klebstoffen mit unterschiedlichen Eigenschaften und von verschiedenen Herstellern. Es wurden insgesamt 10 Klebstoffe verschiedener Hersteller in die Untersuchungen einbezogen. Zunächst wurden Versuche zur Fadenbildung an kommerziellen Dosiersystemen durchgeführt. Die breite Auswahl der Klebstoffe erlaubt nicht, dass alle Systeme mit der gleichen Applikationsanlage verarbeitet werden können. Bei der notwendigen Nutzung unterschiedlicher Dosiersysteme und unterschiedlicher Prozessparameter können Unterschiede in der Fadenlänge daher nicht unmittelbar mit

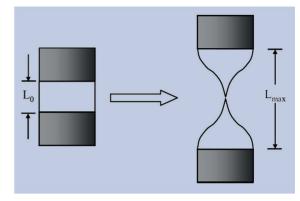


Bild 2 • Schematische Darstellung des Abzugversuchs. (Quelle: Fraunhofer IFAM)

Materialeigenschaften korreliert werden, da sie aus Prozesseinflüssen herrühren könnten. Zur rein materialwissenschaftlichen Charakterisierung der Fadenzugneigung mussten daher vereinfachende, auf unterschiedliche Klebstoffe anwendbare, experimentellen Methoden genutzt werden.

Um einen grundlegenden Erkenntnisgewinn zu erarbeiten, wurden aus diesem Grund neben den industriellen Klebstoffen auch Musterklebstoffe in die Untersuchungen aufgenommen. Diese Musterklebstoffe waren so formuliert, dass sich die Formulierungen möglichst nur in einzelnen rheologischen Eigenschaften und in der Fadenzugneigung unterscheiden. Die Musterklebstoffe waren auf Basis von Epoxiden formuliert und mit den Füllstoffen Kaolin und Siliciumdioxid modifiziert. Die verwendeten Flüssigepoxide waren die Epilox-Epoxidharze A 17-01, A 18-00, A19-00 und A19-02, Hersteller Leuna-Harze, Leuna. Insgesamt wurden neben 10 industriellen Klebstoffen auch 20 Musterklebstoffe hergestellt und untersucht.

Die Charakterisierung der industriellen und Musterklebstoffe erfolgte durch verschiedene Versuche der oszillierenden und kontinuierlichen Scherrheologie am Dehnrheometer, am Kapillarrheometer und mit der Wilhelmy-Platten-Methode. Statt eines voll faktoriellen Versuchsprogramms wurden die Arbeiten kontinuierlich an den Erkenntnisfortschritt angepasst.

Zur Messung der Fadenzugneigung hatte sich ein spezifisch konzipierter "Abzugsversuch" als besonders geeignet herausgestellt, Bild 2. Dabei wurden ein oberer und ein unterer Zylinder mit gleichem Durchmesser verwendet. Der obere Zylinder ließ sich mit einem definierten Geschwindigkeitsprofil in axialer Richtung bewegen. Die Probensubstanz wurde auf den unteren Zylinder aufgetragen und der gewünschte Spalt (L₀, 0,5 mm bis 2,0 mm) angefahren. Nach dem Entfernen der überschüssigen Probensubstanz wurde eine fünfminütige Ruhephase eingehalten und anschließend die Probensubstanz durch die axiale Bewegung mit einer linearen Geschwindigkeit von jeweils 5, 15, 30 und 40 mm/s bis zum Fadenriss auseinandergezogen. Der Versuch wurde optisch bei hoher Bildrate aufgezeichnet. Die Versuche wurden mit Hilfe eines Eigenbaus auf Basis einer "Textur Analyser"-Universalprüfmaschine durchgeführt.

Ausgewertet wurde in diesen Versuchen die maximale Hencky-Dehnung $\varepsilon_{\text{He,max}}$, definiert als Logarithmus des Quotienten aus der Fadenlänge bei Fadenriss geteilt durch die Spalthöhe vor der Deformation, **Formel 2**.

$$He_{\epsilon,max} = ln\left(\frac{L_{max}}{L_0}\right) = ln\left(\frac{Fadenlänge bei Riss}{Anfangsspalthöhe}\right) (2)$$

3.2 Maschinenbauliche Methode

Grundvoraussetzungen für vergleichende Untersuchungen kommerzieller Klebstoffe an bestehenden und neu entwickelten Applikations- bzw. Düsenkonzepten ist eine flexibel einsetzbare Anlagentechnik. Daher wurde ein modulares Applikationssystem mit flexiblen Baugruppen bzgl. Kartuschenwechseln bzw. der Anpassung an unterschiedliche Gebinde, mit einer steuerbaren Dosiergeschwindigkeit, einer flexiblen Dosierung und möglicher Druckentlastung der Kartuschen konzipiert. Der Einsatz unterschiedlichster Applikationsdüsen sowie die Möglichkeit des Kalt- und Warmauftrags war grundlegende Basis der Entwicklung. Während in einem ersten Entwicklungsschritt das Konzept der dreidimensional beweglichen Applikationseinheit (Anbau am Roboter) bei feststehendem Bauteil favorisiert wurde, zeigte sich im Verlauf der Untersuchungen die Notwendigkeit weiterer Optimierungen. Neben Abweichungen von etwa ± 0.3 mm beim Düsenabstand, die sich in der Reproduzierbarkeit der Messungen deutlich ausgewirkten, bestand das Hauptproblem im Anbau von zusätzlichen Komponenten für die aktive Fadentrennung am Roboterkopf. Das optimierte Konzept der "feststehenden zweidimensional beweglichen Applikationseinheit mit zweidimensional bewegtem Bauteil" beinhaltete eine Druckluft-Kartuschenpresse, die über einem XY-Tisch aufgebaut war, Bild 3. Damit konnten auch praxisrelevante Verfahrgeschwindigkeiten (100 mm/s) mit guter Genauigkeit beim Prozessparameter "Düsenabstand" reproduzierbar erzielt sowie bestehende kommerzielle maschinenbauliche Konzepte vergleichend untersucht werden.

4 Ergebnisse

4.1 Materialwissenschftliche Ergebnisse

Die anfänglich durchgeführten experimentellen Untersuchungen an industriellen Dosieranlagen zeigten, dass der Fadenzug bei den betrachteten mittel- bis hochviskosen Klebstoffen durch die Bewegung der Düse nach dem Stopp des Klebstoffflusses hervorgerufen wird. An der Düse haftete ein Teilvolumen des applizierten Klebstoffs. Die Weiterbewegung der Düse zog dieses Teilvolumen in die Länge. Aufgrund der Ähnlichkeit der Fadenbildung bei industriellen Dosieranlagen und dem oben beschrieben Abzugversuch wurde daher die maximale Hencky-Dehnung zur Quantifizierung der Fadenzugneigung genutzt.

Der Abzugsversuch ließ sich durch Strömungssimulationen beschreiben. Das dafür verwendete

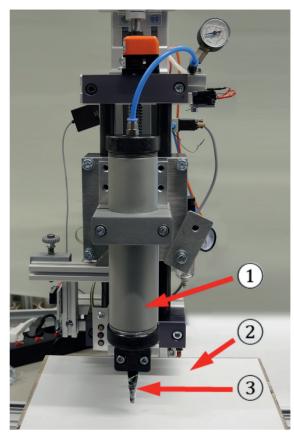


Bild 3 • Modulares Applikationssystem für Laborversuche, 1 senkrecht verfahrbare Druckluft-Kartuschenpresse, 2 zweidimensional verfahrbarer XY-Tisch mit austauschbarer Applikationsebene (DIN A 4 Papier), 3 Kartuschen-Kunststoffdüse mit Dosierspitze. (Quelle: ifs TU Braunschweig)

Programm "Ansys Polyflow" bot eine erweiterte Auswahl von Materialmodellen, unter anderem viskoelastische Materialmodelle. Darüber hinaus ließen sich mit der Arbitrary-Lagrangian-Eulerian-Methode freie, sich geometrisch ändernde Oberflächen simulieren, wie sie bei der Einschnürung und beim Ziehen der Klebstofffäden auftraten. Die Simulationen des Abzugsversuchs, Bild 4, zeigte, dass im Zentrum der Einschnürung beim Fadenzug eine Mischung aus Dehnströmung und Scherströmung vorlag. Dieses Ergebnis war zunächst überraschend, da der Abzugsversuch eine uniaxiale Dehnung

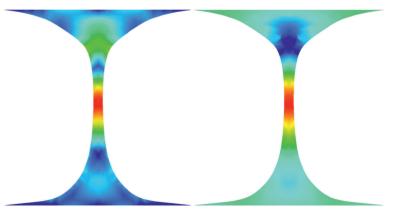


Bild 4 • Scher- und Dehnraten in der Simulation des Abzugsversuchs für eine Kaolinsuspension, exemplarisch bei v=5 mm/s. links: Scherraten 0 (blau) bis 263 s⁻¹ (rot), rechts: Dehnraten –55 (blau) bis 146 s⁻¹ (rot). (Quelle: Fraunhofer IFAM)

vorgibt. Das Einschnüren des Fadens bewirkte aber eine Strömungsgeschwindigkeit des Klebstoffs senkrecht zur Abzugsrichtung und damit eine Scherung des Materials.

Messungen am Rotationsrheometer unter kontinuierlicher Scherung zeigten ein rein newtonsches Verhalten der vier reinen Epilox-Epoxidharze der Musterklebstoffe. Diese Harze zeigten in den Wilhelmy-Messungen annähernd gleiche Oberflächenspannungen. Durch das stetige Hinzufügen der Füllstoffe Kaolin und Siliciumdioxid konnten die Leuna-Harze in Richtung einer Strukturviskosität und eines viskoelastischen Verhaltens modifiziert werden. Die Kaolinsuspensionen auf Basis von A 18-00 zeigten ab 5% Masseanteil an Kaolin Strukturviskosität, also einen Abfall der Viskosität über die Scherrate. Ab einer Zugabe von 20% Masseanteil zeigten sie das Auftreten einer Fließgrenze. Die Phasenverschiebung im linear viskoelastischen Bereich der Kaolinsuspensionen nahm ab einem Masseanteil an Füllstoff von 20% ebenfalls ab. Das Fließverhalten der Kaolin-Suspensionen wechselte also ab 20% Masseanteil vom rein-newtonschen ins viskoelastische Verhalten. Für die Siliciumdioxid-Suspensionen auf Basis von A 17-01 zeigte sich ein ähnliches Verhalten. Mit beiden Suspensionen ließ sich daher der Fadenzug im Übergang vom rein newtonschen zum viskoelastischen Verhalten untersuchen.

Für drei Acrylat-Klebstoffe wurden bei einer Scherrate von 1 s $^{\text{-}1}$ Scherviskositäten im Bereich von 10 bis 50 Pa \cdot s, für ein MS-Polymer etwa 1000 Pa \cdot s und für ein Polyurethan 1500 Pa \cdot s gemessen. Die Klebstoffe deckten daher einen weiten Viskositätsbereich ab. Alle industriellen Klebstoffe zeigten strukturviskoses, viskoelastisches Verhalten. Messungen der Dehnviskosität mit einem Kapillarrheometer zeigten Werte in der Größenordnung der Scherviskositäten.

Interessant war, die ermittelten Materialdaten mit der Messung der maximalen Hencky-Dehnung im Abzugsversuch zu korrelieren. Hierzu konnte genutzt werden, dass die Musterklebstoffe erstens einen weiten Viskositätsbereich und zweitens Übergänge zum strukturviskosen sowie drittens von newtonschen zum viskoelastischen Verhalten zeigten. Die maximale Hencky-Dehnung der unmodifizierten Epoxidharze wurde bei vier verschiedenen Abzugsgeschwindigkeiten bestimmt. Für diese rein newtonschen Fluide zeigte sich ein Anstieg der maximalen Hencky-Dehnung bei steigender Viskosität und bei steigender Abzugsgeschwindigkeit.

Ein anderes Bild ergab sich, wenn die Fluide zusätzlich ein viskoelastisches Verhalten aufwiesen. Dazu wurde die maximale Hencky-Dehnung gegen die Viskosität aufgetragen. Kaolin-Suspensionen mit geringem Füllstoffgehalt zeigten eine rein newtonsche Viskosität und einen Anstieg der maximalen Hencky-Dehnung mit steigender Viskosität. Ab einem Masseanteil an Füllstoff von 20% und einer Viskosität von etwa 40 Pa · s wechselte das rheologische Verhalten der Suspensionen zur Viskoelastizität. Ab diesem Füllstoffanteil sank die maximale Hencky-Dehnung mit zunehmendem Füllstoffanteil. Qualitativ trat das gleiche Verhalten bei den

Siliciumdioxidsuspensionen auf. Aus dem Vergleich von rheologischen Größen und maximaler Hencky-Dehnung wurde gefolgert, dass die Fadenzugneigung von verschiedenen Parametern abhängt:

- je höher die Abzugsgeschwindigkeit v, desto größer ist die Fadenzugneigung,
- je höher die Scherviskosität η, desto größer ist die Fadenzugneigung,
- je kleiner der Fließindex n, desto geringer ist die Fadenzugneigung,
- je niedriger die Oberflächenspannung σ , desto höher ist die Fadenzugneigung.

Zur Prognose der Fadenzugneigung wurde auf den Ansatz in [12] zurückgegriffen: Für rein viskose und schwach elastische Materialien hängt demnach die Fadenzugneigung von der Kapillarzahl $\Lambda = \binom{v \, \eta}{\sigma}$ ab. Weitere Untersuchungen im Projekt zeigten, dass zur Voraussage der maximalen Hencky-Dehnung auf Basis scherrheologisch gewonnener Materialdaten die entwickelte **Formel 3** genutzt werden kann. Die vollständige Ableitung der Formel ist in [13] beschrieben.

$$He_{\varepsilon,max} = n \sin(\delta) \ln\left(\frac{v \eta}{\sigma}\right) + He_{\varepsilon,0}$$
 (3)

Hierbei sind n der Fließindex zur Beschreibung der Strukturviskosität, δ die Phasenverschiebung im linear viskoelastischen Bereich, v die Abzugsgeschwindigkeit, η die Viskosität bei einer Scherrate von 1 s $^{-1}$ und σ die Oberflächenspannung. Der Parameter He $_{\rm e,0}$ wird als "reduzierte Hencky-Dehnung" bezeichnet und ist durch Simulationen zu ermitteln.

Mit Hilfe dieser Formel ließ sich die maximale Hencky-Dehnung der zwei Suspensionen und der industriellen Klebstoffe gut vorhersagen. In **Bild 5** ist der Vergleich zwischen experimentell und durch die Formel bestimmter maximalen Hencky-Dehnung der Kaolin-Suspensionen dargestellt. **Bild 6** zeigt den Vergleich mit fünf industriellen Klebstoffen.

4.2 Maschinenbauliche Ergebnisse

Im Projekt wurden vorwettbewerblich neue Ansätze für einen gesteuerten und kontrollierten Fadenabriss entwickelt, realisiert und erprobt, die jeweils ein anderes Prinzip zur Fadentrennung nutzen. Dabei wurden folgende Mechanismen verfolgt:

- Durch die Einbringung von Druckluft um eine Dosierdüse herum wird gezielt eine hohe Scherrate eingebracht, die eine Viskositätserniedrigung und damit ein Abreißen des Klebstofffadens bewirkt.
- Mit Hilfe eines induktiv aufheizbaren Rings in der Düse wird der Klebstoff kurzfristig stark erwärmt und die Viskosität dadurch reduziert.
- Mit der Anbringung einer Ultraschall-Sonotrode in der Düse wird eine gezielte Scherung in den Klebstoff eingebracht und die Viskosität reduziert.
- Das Abtrennen mit Ultraschallmessern bzw. das Drehen der Düse wird zur mechanischen Fadentrennung an Versuchsdüsen erprobt.

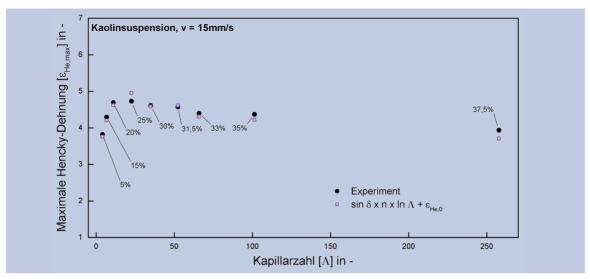


Bild 5 • Maximale Hencky-Dehnung der Kaolinsuspensionen gegen die Kapillarzahl (schwarze Punkte: Abzugsversuche am Textur Analyser, lila Punkte: Vorhersage nach Formel 3 [13]). (Quelle: Fraunhofer IFAM)

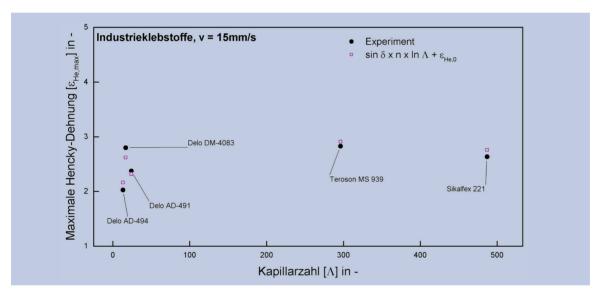


Bild 6 • Maximale Hencky-Dehnung von fünf industriellen Klebstoffen gegen die Kapillarzahl (schwarze Punkte: Abzugsversuche am Textur Analyser, lila Punkte: Vorhersage nach Formel 3 [13]). (Quelle: Fraunhofer IFAM)

Mit flüssigem Stickstoff wird der Klebstoff kurzfristig und punktuell stark abgekühlt, um unterhalb des Glasübergangsbereichs einen Sprödbruch des Klebstoffs zu erwirken.

Zunächst wurden die Prinzipien einzeln an verschiedenen Klebstoffen untersucht und bewertet:

- Beim Trennen durch einen kurzen Druckluftstoß am Applikationsende wird der austretende Klebstoff von der Düsenspitze abgetrennt und auf dem Fügeteil abgelegt. Der entwickelte Düsenaufsatz, als Prototyp generativ gefertigt, kann bei Kartuschen-Kunststoffdüsen verwendet werden.
- Mit Hilfe der induktiv heizbaren Düsenspitze wird der Klebstoff bei Applikationsende kurzfristig stark erwärmt. Der Fadenzug des erwärmten Klebstoffs ist dadurch kleiner. Die Düsenspitze aus Eisen speichert die Wärme jedoch so stark, sodass bei der nachfolgenden Applikation noch warmer Klebstoff austritt und das Auftragsbild dadurch nicht zufriedenstellend

- ist. Die richtige Steuerung der Induktionsenergie ist schwierig; eine zu geringe Erwärmung zeigt kaum Effekt, zu viel Hitze schädigt den Klebstoff.
- Eingekoppelter Leistungsultraschall in der Düse verändert die Klebstoffrheologie. Dadurch reduziert sich der Fadenzug und der Klebstoff trennt sich gut von der Düsenspitze. Der Effekt im Klebstoff ist nach Abschalten des Ultraschalls sofort reversibel, sodass bei der darauffolgenden Applikation kein negativer Effekt erkennbar ist. Der Versuch einer gezielten Ansteuerung der Resonanzfrequenz in der Düsenspitze ließ sich jedoch nicht realisieren, vermutlich aufgrund der Verschraubungen und Dichtungen in der Spitze.
- Durch schnelles Abkühlen der Düsenspitze sollte der Klebstoff aufgrund der Temperaturen unterhalb des Glasübergangs verspröden. Bei den Versuchen wurde der Klebstoff mit flüssigem Stickstoff bis auf –100°C abgekühlt, das heißt mindestens 25 K unterhalb des Glasübergangs. Die Weiterbewegung der Düse führte

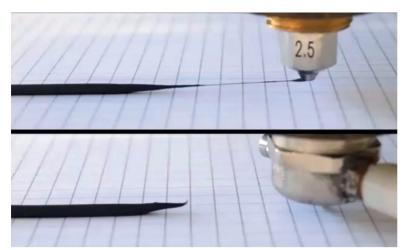


Bild 7 • Fadentrennung durch Heißluft am Beispiel eines Butylkautschuks; oben ohne aktive Fadentrennung, unten mit neu entwickeltem Düsenkonzept. (Quelle: ifs TU Braunschweig)

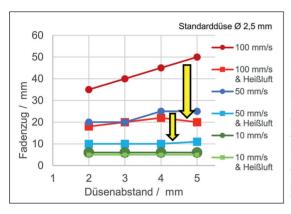


Bild 8 • Applikation von Polyurethan bei Raumtemperatur; gezeigt sind unterschiedliche Düsenabstände vom Bauteil, Applikationsgeschwindigkeiten und der Einfluss des neuen Düsenkonzepts; die Temperatur der Heißluft beträgt 100°C. (Quelle: ifs TU Braunschweig)

jedoch zu keinem Sprödbruch im Klebstoff, sondern es wurde Klebstoff aus der bereits applizierten Raupe nachgezogen, bis der sich bildende Faden dann trennte.

Durch Rotation der Applikationsdüse sollte der Klebstoff sich am Rand der Düse besser trennen. Stattdessen gab es dort eine Ein-schnürung und der Faden war eher länger.

Auf der Basis der gewonnenen Erkenntnisse wurden im weiteren Projektverlauf die Konzepte "Druckluft" und "Rheologieänderung" kombiniert und zu einer neuen Versuchsdüse weiterentwickelt. Beim finalen Düsenkonzept strömt heiße Luft kontinuierlich durch eine doppelwandige Düse um die austretende Klebstoffraupe. Mithilfe dieser Düse konnten auch bei aktuell im industriellen Einsatz stark fadenziehendem Butylkautschuk eine gute Fadentrennung erzielt werden, **Bild 7**. Die Ergebnisse zeigen, dass auch für bei Raumtemperatur zu applizierende MS- und PU-Klebstoffe eine deutliche Verbesserung der Applikationsergebnisse erzielt wurde, **Bild 8**.

5 Fazit und Schlussbemerkung

Der Fadenzug bei der Verarbeitung hochviskoser Klebstoffe entsteht nicht durch einen hochdynamischen Effekt beim Schließen des Dosierventils, sondern beim Abzug der Dosierspitze von der Raupe. Im Projekt "Fadenfrei" wurde hierfür ein Abzugsversuch eingeführt und simuliert. Die Simulationen zeigen Dehn- und Scheranteile der Strömungsgeschwindigkeiten im Zentrum der Fadeneinschnürung. Der Abzugsversuch erlaubt die quantitative Beschreibung der Fadenzugsneigung hochviskoser Klebstoffe. Muster- und industrielle Klebstoffe wurden hinsichtlich ihrer Materialeigenschaften im Projekt charakterisiert. Durch eine abgeleitete Berechnungsformel können jetzt Materialkennwerte und Fadenzugneigung miteinander korreliert werden. Diese Formel kann daher zukünftig von Klebstoffherstellern genutzt

werden, um gezielt Klebstoffe mit geringerer Fadenzugneigung zu formulieren.

Die Untersuchungen der Fadenzugneigung an einem speziell entwickelten Laboraufbau mit hinreichender Nähe zur industriellen Applikation ermöglichten eine Korrelation mit den Materialeigenschaften und führten zu dem vorwettbewerblichen Konzept einer fadenzugmindernden Auftragsdüse mittels Heißluft, die jetzt den Anwendern zur Verfügung steht. Neben der dokumentierten Messvorschrift zur Bestimmung des Fadenzugs werden die neuen Erkenntnisse aus diesem Projekt in das geplante Merkblatt DVS "Fadenzug" einfließen.

DANKSAGUNG

Das IGF-Vorhaben Nummer 19.390 N/DVS Nummer 08.106 der der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V.

des DVS, Aachener Str. 172, 40223 Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.



Literatur

- Giesekus, H.: Phänomenologische Rheologie. Springer-Verlag, Berlin 1994.
- [2] Georgieva, K., D. J. Dijkstra, H. Fricke, N. Willenbacher: Clogging of microchannels by nano-particles due to hetero-coagulation. Journal of Colloid and Interface Science 352 (2010), S. 265/77.
- [3] DIN 54458 "Strukturklebstoffe Bestimmung des Fließund Applikationsverhaltens von viskoelastischen Klebstoffen mit Hilfe der Oszilla-tionsrheometrie" (Ausgabe März 2013).
- [4] Kulicke, W.-M., u. a..: Detektion und Vorhersage des Fadenzugverhaltens. Chem.-Ing.-Tech. 66 (1994), H. 12, S. 1643/46.
- [5] Bär, C., C. Adams, A. Bruhns: Applikation von PUR-Klebstoffen: prozesssicher rheologisch simulieren. Adhäsion kleben & dichten 44 (2000), H. 5, S. 27/31.
- [6] Bolyard, E. W. Jr., M. D. Bauer: Snuffback valve for hot melt adhesive. Patent US6334554 B1, 2002.
- [7] Beck, J. L.: High speed, no stringing, hot melt adhesive dispensing head. Patent US 6105832, 2000.
- [8] Eiler, V., S. Körner: Klebstoff-Schneideinrichtung. Patent DE 10309396 A1, 2004.
- [9] Millies, R.: Verfahren und Vorrichtung zum Aufbringen von Leimportionen aus Heißleim auf Substrate. Patent DE 102017007489 A1, 2019.
- [10] Klapp, H.: Verfahren und Vorrichtung zum Wegblasen von Leimpartikeln in einem Streifenleimwerk für Klebemaschinen. Patent CH 668936 A5, 1985.
- [11] Dorman, K. H., u. a.: Hot melt adhesive dispensing system including adhesive cut-off module. Patent EP 2861357 B1, 2018
- [12] James, D., N. Yogachandra: Filament-breaking length a measure of elasticity in extension. rheologica acta 46 (2006), H. 2, S. 161/70.
- [13] Fassbender, F., H. Fricke, T. Vallée, B. Mayer: Filament breaking length - Experimental and numerical investigations. International Journal of Adhesion and Adhesive 87 (2018), S. 47/63.