Fügen von Polymerfolien mit Hoch Intensivem Fokussiertem Ultraschall: Modellierung der akustischen und thermischen Effekte mittels FEM.

Coralie Koo Sin Lin[1], Marko Liebler[2], Klaus-Vitold Jenderka[3]

[1] *Technische Universität Dresden, Dresden, Deutschland, Email: coralieksl@gmail.com*

[2] *Robert Bosch GmbH, 71272 Renningen, Deutschland, Email: marko.liebler@de.bosch.com*

[3] *Hochschule Merseburg, 06217 Merseburg, Deutschland, Email: klaus.jenderka@hs-merseburg.de*

Einleitung

Eine übliche Maschine zum Verpacken in Beutel ist die Form- Füll- und Verschließmaschine (Abbildung 1). Die Maschine hat 3 Hauptfunktionen: Folien Formen, Packgut in den Schlauch füllen und den Schlauch verschließen [1]. Dieser letzte Schritt ist entscheidend, um den Schutz des Packgutes zu gewährleisten. Aktuell werden das Heißsiegelverfahren (für nicht temperaturempfindliche Güter) und das Ultraschallsiegelverfahren (für temperaturempfindliche Güter) angewendet [2].
Die hier vorgestellte Idee ist es, das Ultraschallsiegeln durch Hoch Intensiven Fokussierten Ultraschall (Abk.: HIFU) zu ersetzen (Abbildung 2 - links). Durch den Einsatz von höheren Frequenzen (1 MHz) und Wellenfokussierung, sind folgende Vorteile zu erwarten:

- kein wahrnehmbares Geräusch für den Menschen
- geringere Belastungen des Packstoffes durch kleinere, aber schnellere Werkzeugsschwingungen
- Möglichkeit die Tiefe und Ausdehnung der thermischen Einwirkung durch die Auslegung der Schallfokussierung zu steuern

Allerdings, im Gegensatz zu den HIFU-Anwendungen in der Medizintechnik, unterscheidet sich der Aufbau bei einer Verpackungsmaschine durch:

- einen Wandler, bestehend aus einer auf einen metallischen Schallleiter geklebten Piezokeramik, in Luftumgebung positioniert
- dünne Polymerfolien (Dicke zwischen 10 µm und 300 µm), direkt unter dem Wandler positioniert und mit Kraft an den Wandler gekoppelt
- einen metallischen Gegenhalter, der die Folien gegen den Schallleiter drückt.
- die Verpackungsfolien, die sich mit hoher Geschwindigkeit, zwischen Wandler und Gegenhalter bewegen, was den formschlüssigen Kontakt zwischen Wandler und Fügeteil erschwert.

Diese Unterschiede führen dazu, dass beim Eintreffen der Wellenfront an der Grenzfläche zwischen Schallleiter und Folien, ein Großteil der Wellen im Schallleiter reflektiert wird und der transmittierte Anteil eine Brechung erfährt. Das gleiche Phänomen passiert zwischen Folien und Gegenhalter. Und schließlich werden die Wellen am Übergang Gegenhalter-Luft komplett reflektiert (Abbildung 2 - rechts). Dieses führt zu hin- und rücklaufenden Wellen im System Wandler/Folien/Gegenhalter und das Aufeinandertreffen der Wellen führt zu Interferenzen. In Folge bildet sich ein stationäres Schallfeld im System aus.

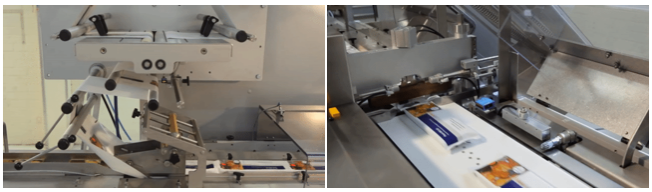

Abbildung 1: Horizontale Form- Füll- und Verschließmaschine für die Herstellung von Beuteln (HFFS).

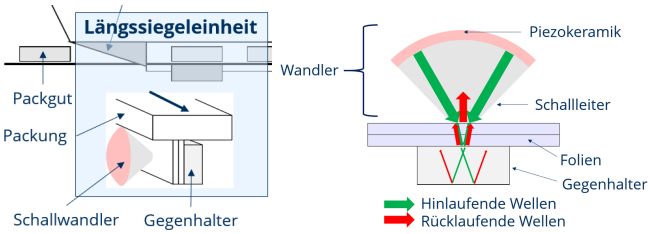

Abbildung 2: (Links) HFFS: Siegeleinheit. (Rechts) Beschreibung der Wirkprinzipien im Wandler [4, 5].

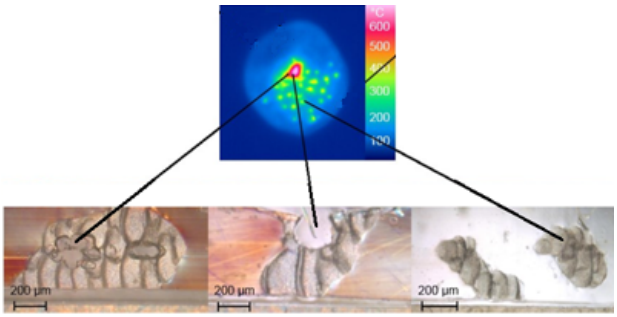

Abbildung 3: Ergebnisse bisheriger Studien [4].

Verschiedene Studien haben die Übertragbarkeit der HIFU Prinzipien auf die Fügeverfahren in Verpackungsmaschinen geprüft und haben gezeigt, dass zwei Polymerfolien mit Dicken im Mikrometerbereich miteinander gesiegelt werden können [3, 4]. Allerdings wurde beobachtet, dass ein inhomogenes Temperaturprofil im Nahtbereich auftritt und dass diese inhomogene Temperaturverteilung zu einer unregelmäßigen Naht führt (Abbildung 3). Das stellt ein Problem für die Beherrschung und Robustheit des Verfahrens dar.
Dazu sind folgende wissenschaftliche Problemstellungen entstanden:

- Welche physikalischen Wirkprinzipien sind verantwortlich für die Erwärmung von dünnen Folien?
- Wie sieht das Schallfeld in dünne Folien aus?
- Kann das Schallfeld überhaupt in dünnen Folien fokussiert werden?
- Welche Zusammenhänge gibt es zwischen Schallfeld und Erwärmung der Folien?

Es ist daher wichtig, die akustischen und thermischen Effekte, die während des Verfahrens auftreten, zu untersuchen, um das Verständnis im Bereich Wandler- und Folienerwärmung zu verbessern sowie die Parametrisierung des Verfahrens zu ermöglichen.

Methode

Das betrachtete System besteht aus einer Piezokeramik, geklebt auf einen Schallleiter, und einen Gegenhalter, der die beide Polymerfolien gegen den Schallwandler drückt.

Um die im System auftretenden physikalischen Wirkprinzipien zu untersuchen und das Schallfeld in den Polymerfolien nicht direkt messbar ist, wird ein Simulationsmodel erstellt. Die Simulation besteht aus einem akustischen Modell und einem thermischen Modell, sequentiell verbunden, d.h. es wird zunächst das stationäre Schallfeld berechnet und dieses als Wärmequelle anschließend im thermisch transienten Modell implementiert. Dieses Vorgehen ist durch die Geschwindigkeit zur Erreichung des stationären Zustandes begründet.

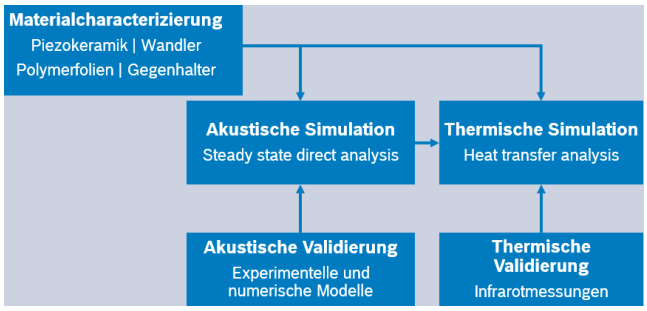

Abbildung 4: Beschreibung der Methodik.

Die Materialeigenschaften von Piezokeramik, Schallwandler, Polymerfolien und Gegenhalter sind der Literatur entnommen, bis auf die Dämpfung. Diese wurde durch Impuls-Echo- und Broadband through transmission Technik ermittelt. Die akustische Simulation ist mittels scanning Laser Doppler Vibrometrie (sLDV) und Schallfeldmessung im Wasser validiert. Die thermische Simulation ist mittels Infrarotkameratemperaturmessungen abgeglichen (Abbildung 4).

Numerische Methoden

Alle drei Simulationstypen sind im Abaqus Software Tool (Simulia - Dassault Systems) als zweidimensionale Achsesymmetrisches System aufgebaut. Das Netz ist hexagonal und mit reduzierter Integration, um die Steifigkeit des Netzes zu reduzieren. Die Netzelemente sind kleiner als ein Zwanzigstel der Materialwellenlänge. Die Kontakte zwischen die verschiedenen Komponenten werden als perfekt betrachtet und somit mit Tie-Contact abgebildet. Die strukturale Dämpfung der verschiedenen Komponenten ist in der Simulation implementiert und die Grenzfläche zwischen Komponenten und Umgebung wird als verlustfrei angenommen (Totalreflexion der Wellen an der Grenzfläche zwischen System und Luftumgebung). Die Randbedingungen sind in Abbildungen 5 und 6 veranschaulicht sowie in [5].

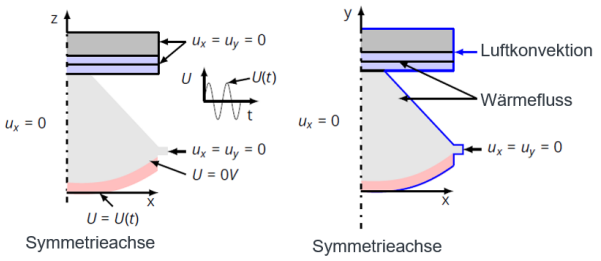

Abbildung 5: (links) Steady state dynamics analysis, (rechts) Heat transfer analysis [5].

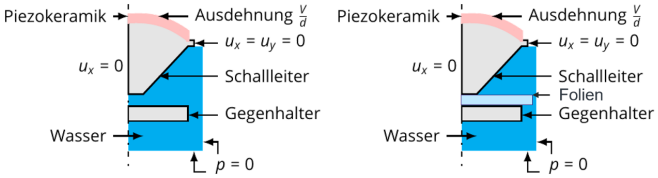

Abbildung 6: Dynamics direct analysis. (links) System im Wasser, (rechts) System im Luft mit Polymerfolien [6].

Experimentelle Methode

Scanning Laser Doppler Vibrometry

Um die akustische Simulation zu validieren, wird im ersten Ansatz die Schallschnelle an der Schallleiterspitze mit der Simulation gemessen und abgeglichen. Dafür ist ein sLDV (Polytec, PSV-500) gegenüber der Schallleiterspitze des Wandlers positioniert. Der Wandler ist nur an Luft gekoppelt und somit unbelastet (Der Einfluss der Kraft auf der Wandlerimpedanz ist vernachlässigbar). Die Einstellungen des Vibrometers sind in Abbildung 7 dargestellt und in der Veröffentlichung [9] beschrieben.

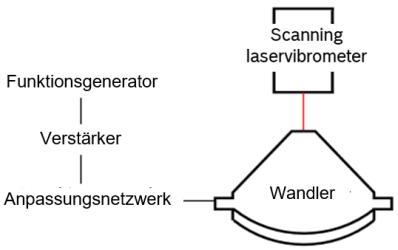

Abbildung 7: Aufbau der Scanning Laser Doppler Vibrometrie Messungen. 2500 scanning points, sampling frequency 31 MHz, bandpass filter zwischen 12,5 und 1250 kHz [9].

Schalldruckmessungen im Wasser

Das Ziel ist hier, den Schalldruck im Wasser zwischen Wandler und Gegenhalter zu messen, um Rückschlüsse

aus einer Analogie mit dem System in Luftumgebung auf die Folien zu ziehen [6].

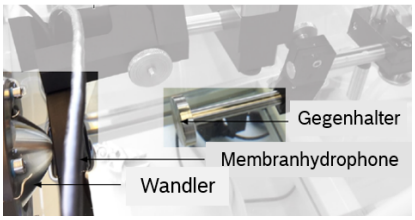

Abbildung 8: Test bench setup for sound field measurement using a membrane hydrophone [5, 6, 8].

Der Wandler ist in einem mit entgasten und deionisierten Wasser gefüllten Tank montiert. Der Schalldruck wird mit einem broadband PVDF Membrane Hydrophone, montiert auf ein dreidimensionales Transportsystem, gemessen. Das Membranehydrophone (GAMPT) ist zwischen Schallwandler und Gegenhalter positioniert. Das Hydrophonsignal wurde vorverstärkt, von einem Oszilloskop erfasst und mit Hilfe der Soniq Software (ONDA) konvertiert. Der detaillierte Aufbau und die Einstellung des Prüfstandes sind in folgenden Referenzen beschrieben [5, 6, 8].

Ergebnisse

Vergleich der berechneten und gemessenen Schallschnelle an der Schallleiterspitze

Die Abbildung 9 zeigt die berechnete und gemessene Schallschnelle an der Schallleiterspitze. Eine gute qualitative als auch quantitative Korrelation ist gefunden. Die Schallschnelle ist in der Mitte maximal und fällt nach außen ab. Eine kleine Abweichung der Amplituden ist am Rand der Schallleiterspitze zu beobachten. Diese kann durch Abnutzung und Verschleiß des Werkzeugs erklärt werden. Die Messungen mit dem sLDV ermöglichen die Schallschnelle an der Schallleiterspitze des Wandlers zu validieren. Sie liefern allerdings keine Informationen über das Schallfeld in Polymerfolien.

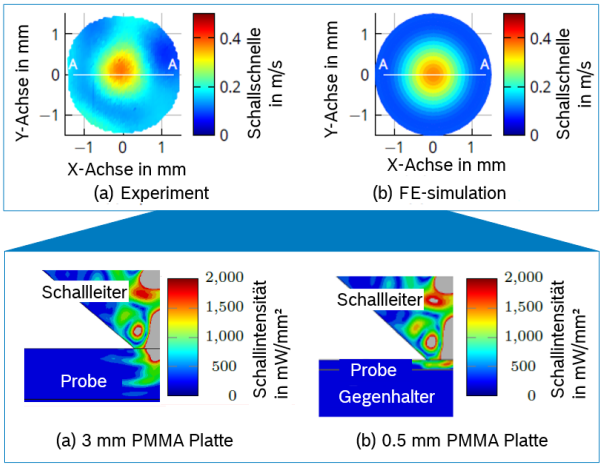

Abbildung 9: Validierung der Schallschnelle an der Schallleiterspitze mittels Vibrometer [9, 10].

Vergleich des berechneten und gemessenen Schalldruckes zwischen Schallleiter und Gegenhalter

Um besser zu verstehen, welche physikalische Phänomene in den Folien stattfinden, sollte das berechnete, in der Folie auftretende Schallfeld validiert werden. Da das Schallfeld in den Folien nicht messbar ist, wird hier ein anderer Ansatz gewählt: das Schallfeld zwischen Wandler und Gegenhalter wird im Wasser gemessen, ohne Folien (siehe Abschnitt *Schalldruckmessungen im Wasser*). Anschließend wird eine numerische Analogie zwischen Wasser und Folien durchgeführt, um das Schallfeld in Folien zu prognostizieren und entsprechend die akustische Simulation zu validieren.

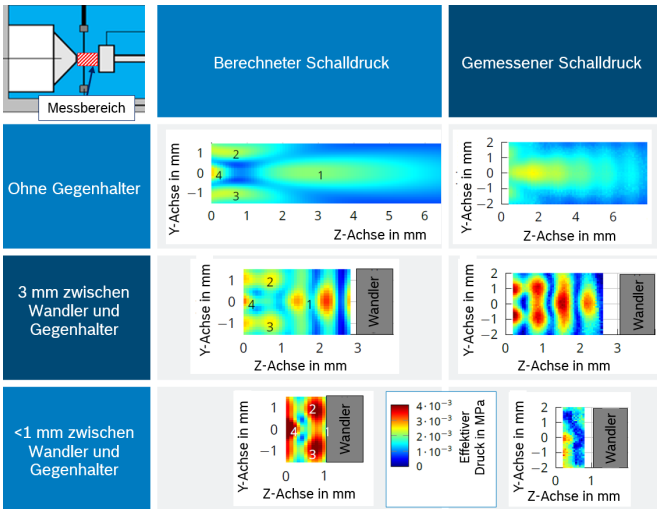

Abbildung 10: Validierung des berechneten Schalldrucks zwischen Schallleiter und Gegenhalter mittels Schalldruckmessungen [5, 6].

Abbildung 10 zeigt die Korrelation zwischen berechneten und gemessenen Schalldruck, je nach Abstand zwischen Schallwandler und Gegenhalter. Im Allgemeinen korrelieren die berechneten Werte sehr gut mit der gemessenen Werte.

- Ohne Gegenhalter: Bei dem gemessenen Schalldruck sind leichte Überlagerungseffekte zu beobachten. Der Fokus ist leicht nach rechts verschoben, was auf eine Abweichung der Materialeigenschaften zurückzuführen ist.
- Gegenhalter 3 mm entfernt von Wandler: Wellenüberlagerungseffekte treten in beiden Fällen auf (Schalldruckmaxima um halb Wellenlänge getrennt). Die leichte Abweichung der Überlagerungsposition ist auf die Toleranz der Gegenhalterposition zurückzuführen.
- Gegenhalter 1 mm entfernt von Wandler (kleiner als die Wellenlänge im Wasser): Der Schalldruck ist minimal in der Mitte des Spalts.

Analogie zwischen Wasser und Polymerfolien

Die Simulation wird auf die Polymerfolien erweitert. Im numerischen Model sind die Folien (gesamte Dicke: 470 Mikrometer) zwischen Wandler und Gegenhalter aufgebaut. Das Wasser ist durch Luft ersetzt. Der Druck ist gleich Null am freien Rand der Folien (siehe Abbildung 11 oben).

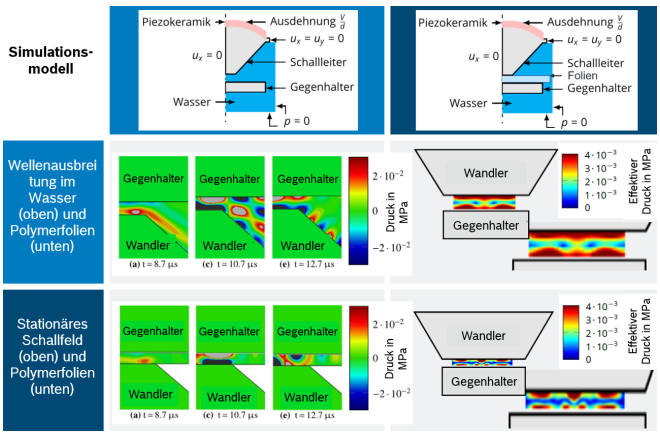

Abbildung 11: Vergleich des Schallfelds zwischen einem System im Wasser und in Luftumgebung [5, 6].

Abbildung 11 zeigt die transienten und stationären Schalldrücke zwischen Wandler und Gegenhalter für beide Fälle: mit Wasser und mit Polymerfolien. In beiden Fällen werden die Welle direkt am Gegenhalter reflektiert, ohne dass die Wellen sich im Spalt fokussieren können. Es treten komplexe Interferenzen auf. Das stationäre Schallfeld zeigt in beiden Fällen, dass der Schalldruck minimal in der Mitte des Wasserspalts ebenfalls in den Folien und maximal an den Übergänge Metall/Wasser und Metall/Folien sind. Trotz einer sehr guten Übereinstimmung der Wellenausbreitung zwischen Wasser und Polymerfolien sind ein paar Unterschiede zu beobachten:

- Die Abstände zwischen den Schalldruckmaxima sind kleiner bei den Folien. Es liegt daran, dass die akustische Impedanz der Folien kleiner ist als die von Wasser (allerdings ist der Unterschied vernachlässigbar gegenüber dem Impedanzsprung zwischen Metall und Folien/Wasser).
- Dazu breiten sich die Wellen im Wasser um den Wandler aus, im Gegenteil zum Übergang Wandler/Luft, wo die Wellen im Wandler reflektiert werden.
- Die Viskosität des Polymers ist größer als die von Wasser.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass durch die Kopplung von Experiment und Simulation, die physikalische Phänomene in den Folien verstanden werden können, z. B. der Verlauf der Wellenausbreitung und Überlagerungen in dünnen Polymerfolien sowie die Korrelation zwischen Welleninterferenzen und Folienerwärmung kann damit analysiert werden.

Um die physikalischen Phänomene noch genauer abzubilden, ist eine Erweiterung der Simulationen zu empfehlen:

- Abbildung der Dämpfung in Abhängigkeit der Zeit und Temperatur des Systems
- Implementierung der Ausdehnung des Wandlers während des Betriebs
- Modellierung der laufenden Polymerfolien unter den Wandler: Kontakte Wandler/Folien und Folien/Gegenhalter sollten abgebildet werden
- Modellierung des Phasenübergangs der Folien (von fest zu flüssig)

Literatur

[1] Bleisch et al.: Verpackungstechnische Prozesse: Lebensmittel-, Pharma- und Chemieindustrie. 1. Aufl. Hamburg: Behr, 2011 (Theorie und Praxis). – ISBN 9783899472813

[2] Bach, S.: Untersuchung der Vorgänge und Einflüsse beim Ultraschallfügen flexibler polymerer Packstoffe. Dresden, Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, PhD-Thesis, 2014

[3] Bach , S.: Vorstudie zum Einsatz des hochintensiven fokussierten Ultraschalls für Anwendungen in der Verpackungsindustrie. Dresden, Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, in Auftrag von Robert Bosch Packaging Technology GmbH, 2011

[4] Oehm, L.: Fügen polymerer Packstoffe mit hochintensivem fokussierten Ultraschall, Dissertation veröffentlicht im Qucosa am 09.10.2017, Technische Universität Dresden, https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-229247

[5] Koo Sin Lin, C.: Ultrasonic Mechanisms, Heating and Sealing Behavior of Polymer Films Induced by High-Intensity Focused Ultrasound. Dresden, Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, PhD-Thesis, 2020

[6] Koo Sin Lin et al.: Investigations on the sound field between waveguide and counterpart induced by high-intensity focused ultrasound in thin polymer films. In: Applied acoustics 142 (2018), 114–122. http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.08.011. – DOI 10.1016/j.apacoust.2018.08.011

[7] Koo Sin Lin et al.: Joining of polymer films: investigation on the physical principles. Version: 2018. http://dx.doi.org/10.1109/ULTSYM.2018. 8580190. In: 2018 IEEE International Ultrasonics Symposium.

[8] Koo Sin Lin et al.: Study of the sound field in thin polymer films induced by High-Intensity Focused Ultrasound. In: Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics, 2019

[9] Koo Sin Lin et al.: Investigations on the correlation between particle velocity distribution and PMMA heating effect induced by high-intensity focused ultrasound. http://dx.doi.org/10.1109/ULTSYM.2017.8091823. In: 2017 IEEE International Ultrasonics Symposium.

[10] Koo Sin Lin et al.: Heating of Polymer Films Induced by High-Intensity Focused Ultrasound: Study of Acoustic and Thermal Effects. In: IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control (2019), http://dx.doi.org/10.1109/TUFFC.2019.2940380.

[11] Koo Sin Lin et al.: Innovative focused ultrasound-based sealing method of flexible packaging films—Principles and characteristics. Packag Technol Sci. 2020; 33: 397– 405. https://doi.org/10.1002/pts.2510