

# Simulation des Öffnungsverhaltens peelbarer Schalen

Stephan, Benjamin

## 1 Einleitung

Vor dem Hintergrund steigender rechtlicher und ökonomischer Anforderungen an abpackende Unternehmen und Ansprüche der Verbraucher an Verpackungen steht unter anderem die effiziente Auslegung von Verpackungen im Fokus. Insbesondere peelbare Schalen sollen einerseits leicht zu öffnen, andererseits aber auch sicher verschlossen sein. Dabei hängt die Einschätzung, ob die Verpackung den Komfort- und Sicherheitsanforderungen genügt von vielen Faktoren ab, die bei aktueller Betrachtungsweise nur eine unzureichende Aussage ermöglichen.

Um den Öffnungsvorgang hinsichtlich der verbraucherfreundlichen Aspekte beurteilen zu können, ist es notwendig, die Öffnungskräfte des gewählten Verpackungskonzeptes bei gleichen Bedingungen zu ermitteln, die der Verbraucher letztlich beim Öffnen ebenfalls vorfindet. Klassischerweise wird hierzu die Siegelnahtfestigkeit von Streifen oder ganzen Verpackungen ermittelt und damit auf die gesamte Verpackung geschlossen. Zudem ist es möglich, über die Berechnung der Peellinie die Öffnungskraft bezogen auf die Siegelnahtkontur zu berechnen. [1–3]. Unberücksichtigt bleiben dabei jedoch der Einfluss der Verformung der Verpackung und die Grifftechniken, was sich insbesondere bei sehr flexiblen Verpackungen auf die Öffnungskraft oder den gesamten Öffnungsvorgang auswirken kann.

Eine zu leicht zu öffnende Verpackung hat jedoch auch den Nachteil, dass die Verpackung während üblicher Transport- und Logistikprozesse die auf sie wirkenden Belastungen abfangen muss. Der kritische Bereich ist hier die Siegelnaht, welche eine Mindestfestigkeit erreichen muss. Erheblichen Einfluss hat jedoch nicht nur die Siegelnahtkontur und die Siegelnahtfestigkeit, sondern auch das Verformungsverhalten der Schale.

Um schon während des Designprozesses eine optimale Auslegung zu gewährleisten, bieten sich numerische Simulationen an, welche das Öffnungsverhalten unter Berücksichtigung der Schalen- und Siegelnahtgeometrie sowie der Nahtfestigkeiten abbilden können.

Ziel der Simulation ist es letztlich, die notwendigen Kräfte vorherzusagen, welche beim Öffnen der Verpackungen durch äußere Belastungen notwendig sind. Im Ergebnis lassen sich damit sowohl die aufzubringenden Öffnungskräfte durch den Verbraucher bestimmen, als auch eine Einschätzung zur Transportsicherheit der Gesamtverpackung geben. Im Folgenden wird anhand eines Beispiels aufgezeigt, wie der Öffnungsvorgang durch den Verbraucher simuliert

und das dazu notwendige Vorgehen zur Modellierung und Parametrierung umgesetzt werden kann.

## 2 Stand der Technik

Detaillierte Simulationsstudien von Nahttrennprozessen blieben bisher auf einzelne Streifen-tests beschränkt, eine Betrachtung ganzer Verpackungen wurde nicht vorgenommen. Zum Peelverhalten von Siegelnähten sind aus der wissenschaftlichen Gemeinschaft einige Veröffentlichungen bekannt. Im Folgenden soll ein kurzer Überblick über den Stand der Technik zu Simulationen von Verbraucherverpackungen gegeben werden.

Relevant ist insbesondere die Veröffentlichung von Gordon et al [4]. Die Autoren beschreiben einen Ansatz zur Simulation der Nahttrennung dünner, peelbarer Folien mit unterschiedlichem Polybuten-1 Gehalt. Die für die Simulation notwendigen Parameter des Kohäsivzonenmodells wurden aus den Kraft-Weg-Verläufen der Peel-Experimente abgeleitet. Eine gute Übereinstimmung der Simulation zu den Experimenten wurde nachgewiesen. Weiterhin wurde ein neuer Ansatz beschrieben, welcher eine Berücksichtigung von viskoelastischen Effekten (Relaxation, Kriechen) zusätzlich zu den bereits möglichen dehnratenabhängigen Effekten ermöglicht.

Yang et. al beschreiben eine Simulation eines T-Peeltests von verschweißten, beschichteten Gewebefolien [5]. Die Schweißnaht wurde in der Simulation geometrisch exakt nachgebildet, so dass auch die ausgequetschte Schmelze mit berücksichtigt wurde. Zur Vereinfachung wurde nur bis zur Rissinitiierung simuliert, der eigentliche Nahttrennungsvorgang wurde nicht mit betrachtet. Insgesamt wurde eine gute Übereinstimmung zwischen den simulativ und experimentell ermittelten Zugprüfwerten erreicht.

Bruce et. al nutzen die Finite-Elemente-Simulation zur Untersuchung von Adhäsiven bei Verbundmaterialien [6]. Im Fokus steht dabei das Verhalten der Adhäsive zwischen der Aluminiumschicht zu den angrenzenden Schichten der Verbundfolie. Es wird darauf hingewiesen, dass eine Berücksichtigung der Materialeigenschaften des Peelarms und die viskosen Eigenschaften der Adhäsivhaftung wesentlich, die Bestimmung der Parameter jedoch schwierig ist. Genutzt wurden Kohäsivelemente, mit denen im Wesentlichen eine gute Übereinstimmung zu den experimentellen Versuchen erreicht wurde. Weiterhin wird ausgeführt, dass eine dreidimensionale Simulation zu sehr großen Rechenzeiten führt, da ein sehr feines Netz zur Abbildung der Adhäsivhaftung notwendig ist.

## 3 Modellierung und Parametrierung des Simulationsmodells

### 3.1 Überblick

Um das Öffnungsverhalten mittels numerischer Simulation abzubilden, ist sowohl eine Betrachtung des Bruchprozesses als auch des Materialverhaltens der Schale und der Deckfolie notwendig. Das Simulationsmodell lässt sich in diese einzelnen Teilbereiche trennen, welche weitgehend einzeln modelliert bzw. parametrierbar sind. In Abbildung 1 sind diese Teilbereiche dargestellt, sowie die Angabe zur Datengrundlage für die Parametrierung. Die Schalenform und Siegelnahtkontur lassen sich aus vorhandenen CAD-Daten exportieren, während für das Material- und Bruchverhalten eigene (Ersatz-)versuche durchgeführt werden müssen. In der vorliegenden Arbeit stand das Kohäsivpeel-System im Fokus.

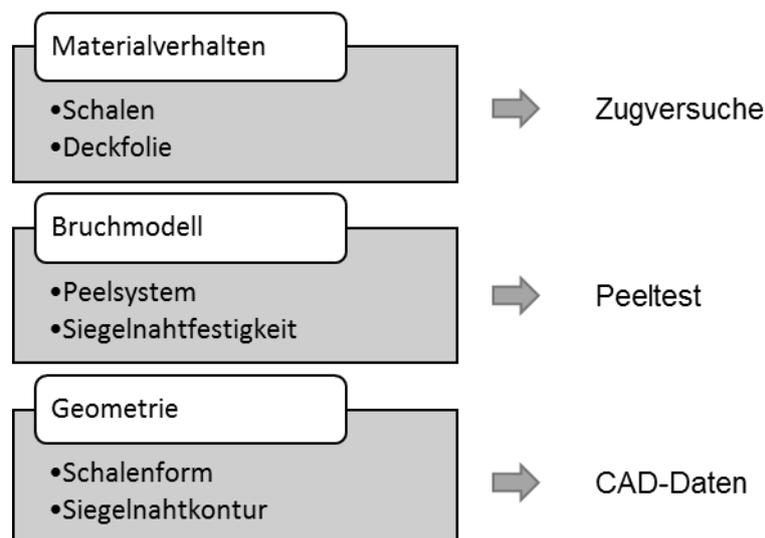


Abbildung 1: Darstellung der Teilbereiche des Simulationsmodells und der Datengrundlage für die Parametrierung

Im Folgenden werden die einzelnen Teilbereiche näher betrachtet und anhand eines durchgängigen Beispiels exemplarisch erläutert. Die Simulationen wurden mit LS-DYNA R10 double precision SMP durchgeführt und mittels nichtlinearen impliziten Solvers gelöst.

### 3.2 Materialverhalten

#### 3.2.1 Zugversuche

Der notwendige Abgleich der Materialdaten mit experimentellen Daten erfolgte wie in Abbildung 2 dargestellt. Die Datengrundlage bilden uniaxiale Zugversuche der einzelnen Folienla-

gen (PE 50 µm, PET 12 µm), welche nach DIN 527-3 durchgeführt wurden. Die Charakterisierung der Einzellagen ist notwendig, um einerseits gegebenenfalls schnell Änderungen der Dicke der einzelnen Lagen durchzuführen, andererseits aber auch um das richtungsabhängige Biegeverhalten der Gesamtfolie abzubilden.

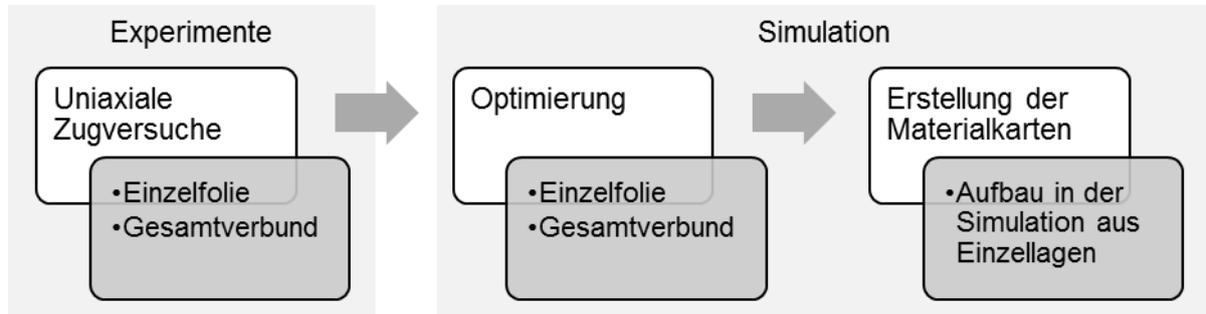


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Methodik zur Charakterisierung der Folienmaterialien

Stand der Technik für die Simulation des Verhaltens von Polymeren sind nichtlineare Materialmodelle. Je nach Anforderung können dabei viskoelastische Effekte mit berücksichtigt werden, sodass insbesondere bei hohen Deformationsgeschwindigkeiten das Materialverhalten abgebildet werden kann. Im vorliegenden Beispiel wurde dies nicht berücksichtigt, da alle Versuche bei gleicher Prüfgeschwindigkeit durchgeführt wurden.

Vereinfacht wurden ebenso isotrope Eigenschaften angenommen, womit die Probenentnahme nur in Maschinenaufrichtung erfolgte. Als nichtlineares Materialmodell wurde das Modell „Piecewise-Linear-Plasticity“ verwendet, welches die Eingabe einer Spannungs-Dehnungskurve ermöglicht. Die Beschreibung der dieser Abhängigkeit erfolgt dabei über die Gleichung:

$$\sigma(\varepsilon_p) = \sigma_y + Q_{r1}[1 - \exp(-C_{r1} \varepsilon_p)] + Q_{r2}[1 - \exp(-C_{r2} \varepsilon_p)]$$

Für die Parametrierung des Materialmodells sind die Koeffizienten  $\sigma_y$ ,  $Q_{r1}$ ,  $Q_{r2}$ ,  $C_{r1}$ ,  $C_{r2}$  sind zu ermitteln. Die Abbildung in der Simulation erfolgt dann über einen Composite-Aufbau von Schalenelementen, wodurch sich der Gesamtverbund flexibel aus vorhandenen Materialkarten aufbauen lässt.

### 3.2.2 Optimierung

Für die Ermittlung der Parameter der oben beschriebenen Gleichung wurde eine automatische Parameteroptimierung mit LS-OPT durchgeführt. Hierfür wurde in LS-DYNA ein uniaxialer Zugversuch als Viertelmodell aufgebaut, welches durch Parametervariation optimiert wurde. Das Elastizitätsmodul und die Fließspannung ( $\sigma_y$ ) wurden aus den experimentellen Daten berechnet, wodurch jeweils vier Parameter der einzelnen Verbundschichten optimiert wurden.

Wie bereits in Abbildung 2 dargestellt, wurden jeweils die Einzelfolien und der Gesamtverbund gemeinsam optimiert. Somit wird sichergestellt, dass sowohl das Verhalten der einzelnen Lagen, als auch das Verhalten den Gesamtverbundes bei Zugbelastungen korrekt abgebildet wird.

### 3.2.3 Ergebnisse

Wie in Abbildung 3 ersichtlich, wurde durch die Optimierung eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den experimentell und simulativ ermittelten Kraft-Weg-Kurven erreicht. Besonders relevant ist der Bereich bei geringen Dehnungen, da bei der Simulation des Öffnungsverhaltens keine großen plastischen Dehnungen zu erwarten sind. Dieser Bereich wird durch das optimierte Materialmodell ebenfalls sehr gut abgebildet.

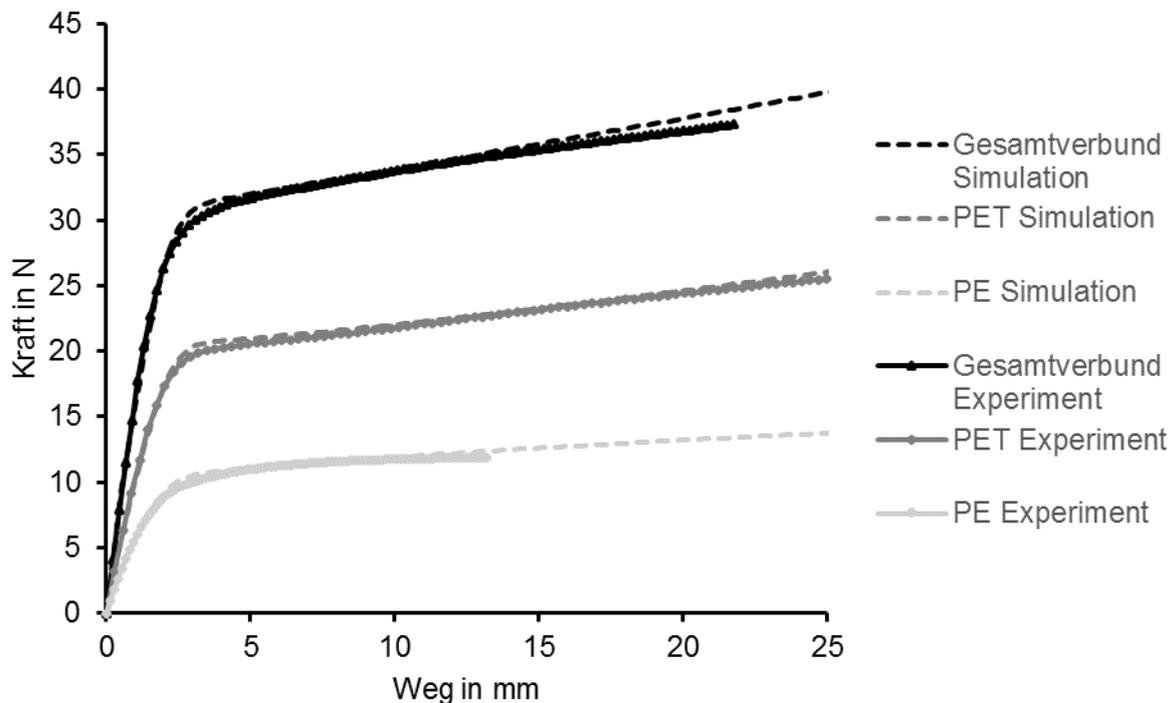


Abbildung 3: Kraft-Weg-Verlauf des uniaxialen Zugversuches für die verwendeten PET/PE-Folien

## 3.3 Bruchmodell

### 3.3.1 Überblick

Zur Modellierung des Bruchverhaltens gibt es im Wesentlichen zwei unterschiedliche Herangehensweisen: eine Modellierung über Kohäsivelemente oder über lösbare Kontakte zwischen verschiedenen Körpern [7]. In Voruntersuchungen wurde festgestellt, dass sich Kohäsivelemente bei groben Vernetzungen als vorteilhaft erweisen, was insbesondere für die Simulation

von ganzen Verpackungskonzepten von Bedeutung ist. Veröffentlichungen zur Anwendung von Kohäsivelementen sind vor allem aus dem Automobilbau für die Abbildung von Klebeverbindungen bekannt [8]. Für eine detaillierte Beschreibung der Kohäsivzone sei an dieser Stelle zum Beispiel auf [6] verwiesen. Im vorliegenden Beispiel wurde auf das Materialmodell „Cohesive\_Mixed\_Mode“ zur Beschreibung der Kohäsivzone zurückgegriffen. Bei diesem Modell erfolgt die Trennung elastisch bis zur Versagensgrenze. Eine Belastungs- und Entlastungsabhängige Schadensentwicklung wurde nicht berücksichtigt, da die Belastung beim Öffnen stetig ist. Vereinfachend wurde ebenfalls auf die Unterscheidung der normalen und tangentialen Richtung verzichtet, wodurch sich die Anzahl der zu bestimmenden Parameter von acht auf vier reduziert.

Wie [9] darauf hinweisen, spielt die Elementgröße bei der Modellierung eine entscheidende Rolle, um die Kohäsivzone entsprechend abzubilden. In [10] wird jedoch beschrieben, dass die einzig praktikable Vorgehensweise bei großen Modellen ist, die Verbindung über Ersatzmodelle mit künstlichen Materialparametern abzubilden. Ein ähnlicher Ansatz wurde auch im vorliegenden Beispiel verfolgt. Aus Effizienzgründen wurden sowohl für den Streifentest als auch für die spätere Simulation der kompletten Schale Elementgrößen von ca. 0,3 mm Kantenlänge in x-Richtung verwendet. Dies ergibt insbesondere beim Streifentest eine grobe Diskretisierung im Bereich der Peelfront (siehe Abbildung 4), wodurch sich die Schalenelemente der Folie und die Kohäsivelemente teilweise durchdringen. In z-Richtung wurde die Siegelnäht durch eine einzelne Elementreihe abgebildet.

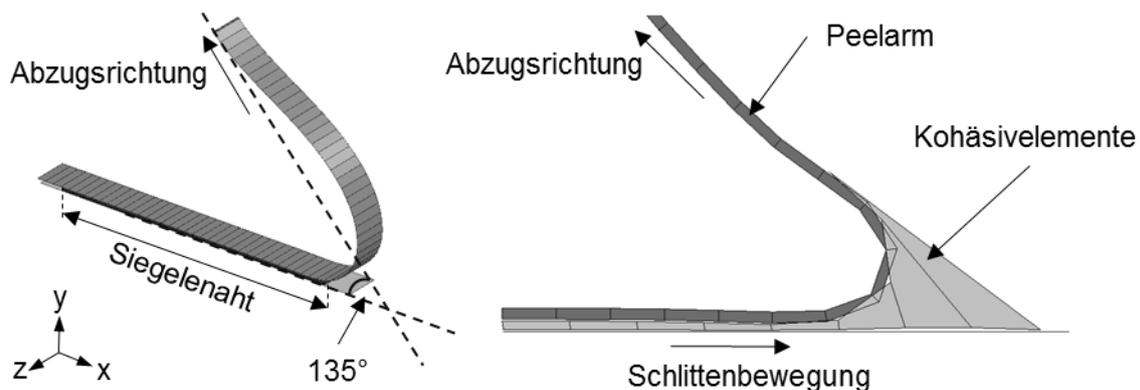


Abbildung 4: Modellierung des Streifentest in der Simulation (links); Detailansicht der Peelfront (rechts)

### 3.3.2 Experimentelle Parameterbestimmung

In [4] ist bereits die Herleitung der notwendigen Parameter aus einem Streifentest, wie der Energiefreisetzungsrates oder der maximalen Zugkraft, ausführlich beschrieben. Im vorliegen-

den Beispiel wurde analog vorgegangen, nur der Trennwinkel wurde auf 135° anstatt 90° beschränkt. Der dafür notwendige Versuchsaufbau wurde bereits in [1, 2] beschrieben. In Abbildung 5 sind die einzelnen Kraft-Weg-Kurven des Streifen tests sowie der Mittelwert dieser dargestellt. Die Peelkraft wurde im Bereich des Plateaus ermittelt.

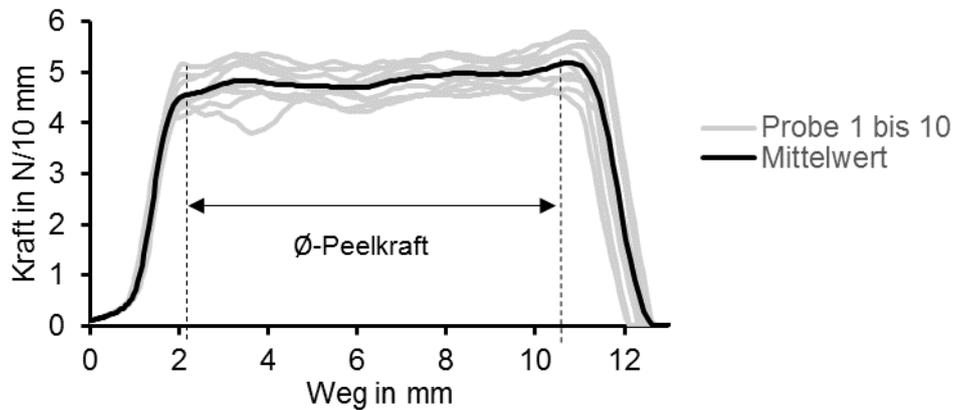


Abbildung 5: Experimentelle Werte des Kraft-Weg-Verlaufs beim Streifen test; Markierung: Bereich zur Ermittlung der durchschnittlichen Peelkraft

### 3.3.3 Ergebnisse

Als Abgleich zum Experiment wurde der gleiche Versuchsaufbau in der Simulation modelliert (siehe Abbildung 4). Die Folie wurde in der Simulation vergleichbar zum Experiment aus dem flachen Zustand in den Ausgangszustand für den Peelversuch überführt, um etwaige Einflüsse durch den Einspannprozess mit abzubilden.

Zum Abgleich der Simulation wurde vergleichbar zum bereits beschriebenen Vorgehen für die Parameteroptimierung für das Materialverhalten vorgegangen. Die Zielkriterien bei der Optimierung waren dabei die Minimierung der Abweichung von der durchschnittlichen Peelkraft und die Schwankungsbreite der Peelkraft im Plateaubereich. Die Berücksichtigung der Schwankungsbreite ist vor dem Hintergrund der groben Diskretisierung notwendig, um den Einfluss derselben auf das Gesamtmodell gering zu halten.

Wie in Abbildung 6 ersichtlich, wurde die Peelkraft im Mittel gut abgebildet. Der schnellere Anstieg der Kraft in der Simulation gründet sich vor allem darauf, dass der Randbereich der realen Siegelnaht einen Festigkeitsgradienten durch unterschiedliche Kontaktverhältnisse und Temperatureinflüsse aufweist. In der Simulation ist dies jedoch nicht berücksichtigt worden. Deutlich erkennbar ist ebenso die Schwankung der Kraft in der Simulation um den Mittelwert, was letztlich die zeitliche Abfolge des Versagens der einzelnen Kohäsivlemente abbildet

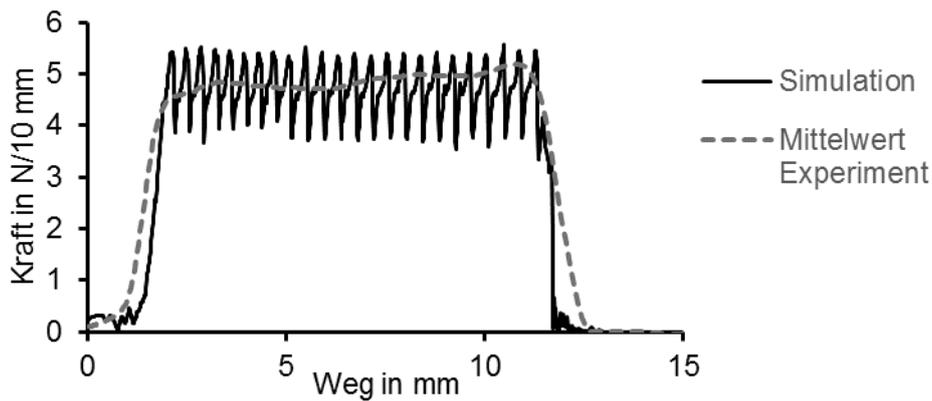


Abbildung 6: Vergleich des Kraft-Weg-Verlaufs beim Streifenrest zwischen Experiment und Simulation

## 4 Simulation des Öffnungskraftverlaufs der Anrissgeometrie

### 4.1 Modellierungsaspekte

Im vorherigen Kapitel wurde aufgezeigt, dass der Peelvorgang prinzipiell abbildbar und die notwendigen Materialparameter durch standardisierte Versuche ermittelt werden können. Die Simulation einer ganzen Verpackung hat jedoch andere Anforderungen. So steigt durch die deutlich höhere notwendige Elementanzahl die Rechenzeit erheblich an. Eine Reduzierung des Simulationsmodells auf den für den späteren Anwendungszweck wesentlichen Bereich ermöglicht dennoch eine erste Abschätzung über die Eignung des Verpackungskonzeptes. In Abbildung 7 sind das Schalenkonzept und die Siegelnahtkontur, welche im Folgenden untersucht wurden, dargestellt. Ebenso ist der Ausschnitt der Anrissgeometrie, welcher genauer modelliert und simuliert wurde, mit angegeben.

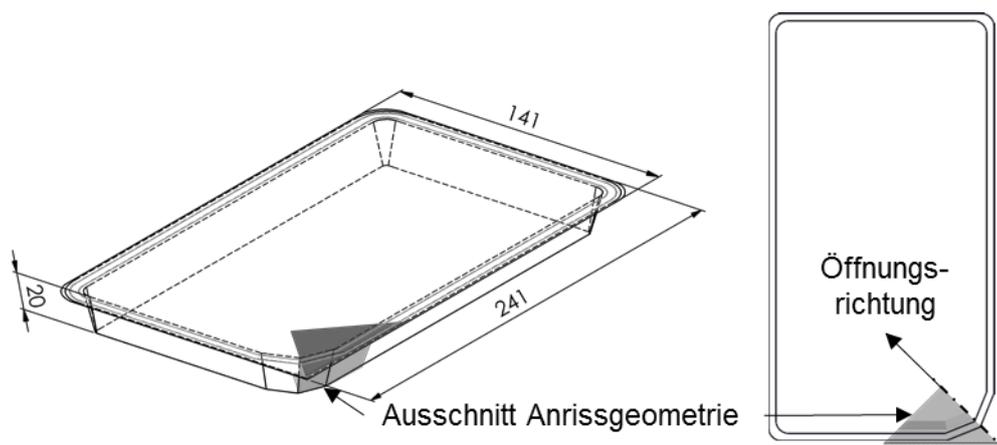


Abbildung 7: Schalenkonzept und Siegelnahtkontur mit Darstellung der Anrissgeometrie

Ein Ansatz, um vergleichende Ergebnisse, beispielsweise zum Einfluss der Wanddicke der Schale, zu erhalten, ist die analytische Betrachtung des Öffnungskraftverlaufs. Wie in [1–3]

beschrieben, lässt sich der Weg-Öffnungskraftverlauf über die Peellinie und Siegelnahtfestigkeit berechnen. Dies gibt bereits einen ersten Hinweis, an welcher Stelle die maximale Kraft zu erwarten ist. Im Beispiel war dies der Bereich der Aufreißlasche, da dort die Peellinie am längsten ist (vgl. Abbildung 8).

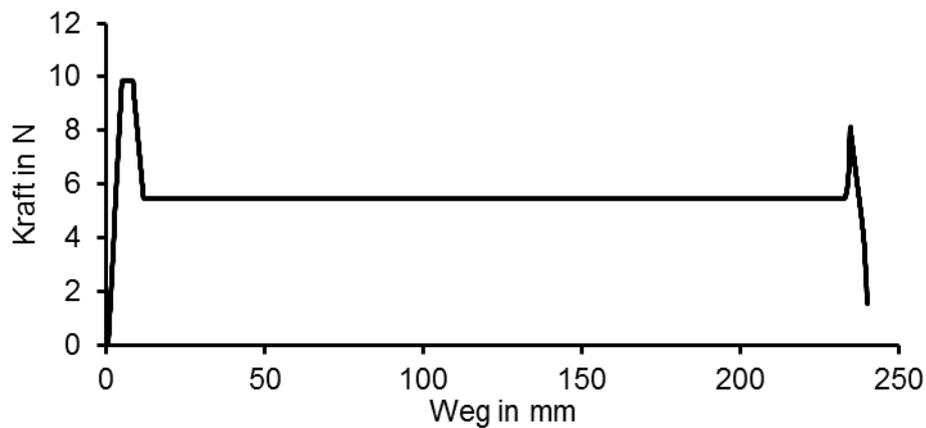


Abbildung 8: Analytisch berechneter Öffnungskraftverlauf unter Berücksichtigung der Siegelnahtkontur und durchschnittlichen Peelkraft

Im ersten Schritt wurde daher dieser Bereich simuliert, wobei die Geometrie aufgrund der symmetrischen Bedingungen nur zur Hälfte modelliert und mit unterschiedlich großen Elementen vernetzt wurde (vgl. Abbildung 9).

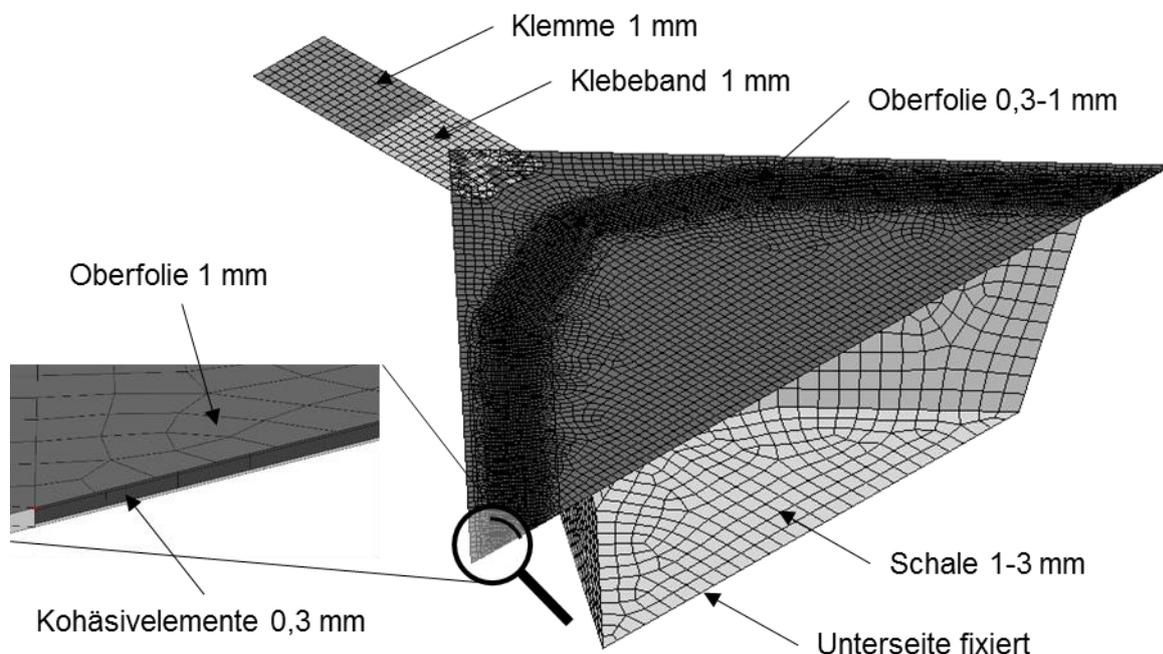


Abbildung 9: Modellaufbau der Anrissgeometrie mit Angabe der jeweils verwendeten Elementgrößen

Im Bereich der Siegelnahtkontur ist die Vernetzung feiner ausgeführt worden, um den geringen Biegeradius der Siegelnahtverbindung beim Abziehen mit abzubilden. Die Klemme wurde als

Starrkörper ausgeführt und wie im Experiment aus dem flachen Zustand in die Ausgangsposition für den Peelversuch geführt. Abgesehen von den Kohäsivelementen zur Abbildung der Siegelnahtverbindung, welche als Volumenelemente aufgebaut wurden, wurden die restlichen Körper aus Schalenelementen aufgebaut.

## 4.2 Ergebnisse

### 4.2.1 Einfluss der Foliendicke der Schale auf die Öffnungskraft

Mit dem beschriebenen Simulationsmodell war es nunmehr möglich, verschiedene Einflüsse auf das Öffnungsverhalten zu untersuchen. Interessant war dabei insbesondere die Dicke der Schale, da erwartet wurde, dass sich Verformungen der gesamten Verpackung auch auf den Öffnungsprozess mit auswirken. Abbildung 10 zeigt den Einfluss der Foliendicke der Schale auf den Öffnungskraftverlauf.

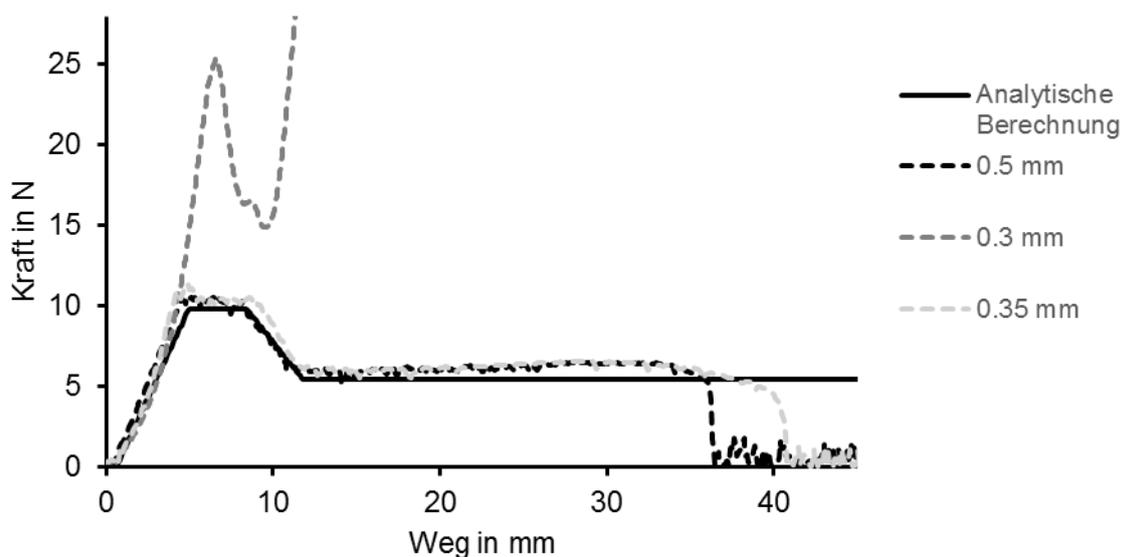


Abbildung 10: Weg-Öffnungskraftverlauf in Abhängigkeit zur Foliendicke der Schale

Ab einer Foliendicke von ca. 0,35 mm ist der Einfluss nur noch gering, da darüber hinaus die Verformungen der Schale insgesamt gering sind. Wird die Foliendicke reduziert, verformt sich die gesamte Verpackung jedoch deutlich mehr. Infolge der gegenüber der Siegelnahtfestigkeit zu geringen Steifigkeit der Verpackung wird die Oberfolie mit nach oben gezogen (Abbildung 11). Ein Öffnen der Verpackung unter den gegebenen Randbedingungen ist demnach nicht möglich.

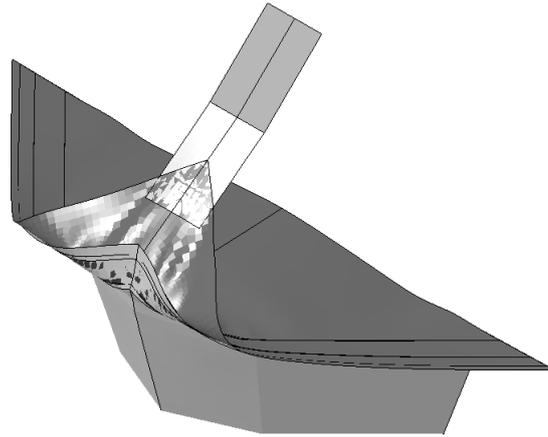


Abbildung 11: Darstellung der Verformung bei 0,3 mm Foliendicke der Schale bei Weg 6,8 mm

#### 4.2.2 Einfluss der Grifftechnik auf die Öffnungskraft

Durch den flexibel gestaltbaren Aufbau der Simulation war es zudem möglich, verschiedene Öffnungsszenarien zu testen, beziehungsweise Grifftechniken nachzubilden. In Abbildung 12 sind zwei verschiedene Öffnungsszenarien dargestellt.

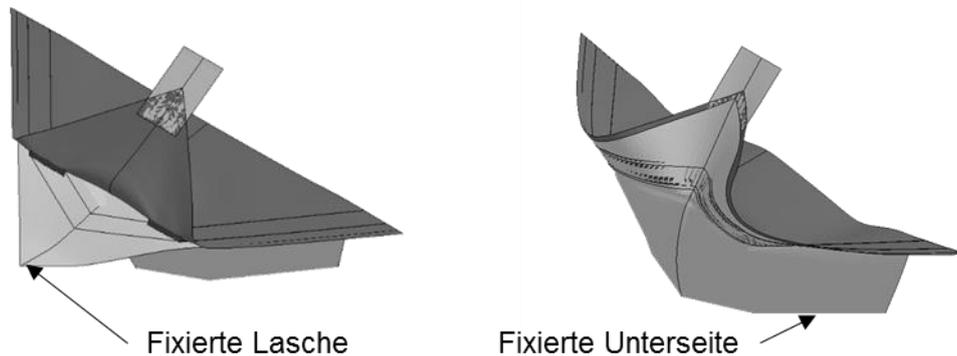


Abbildung 12: Verformung der Schalen bei einem Öffnungsweg von ca. 10 mm bei unterschiedlichen Fixierungsarten

Diese unterscheiden sich nur im Ort der Fixierung, wodurch der Einfluss der Einspannung auf der Prüfmaschine (fixierte Unterseite) und die wahrscheinliche Grifftechnik (fixierte Lasche, Schale sonst frei beweglich) hinsichtlich des Öffnungsverhaltens verglichen werden können.

Im Beispiel wurde so die Öffnungskraft bei der geringsten Schalendicke verglichen. Wie im vorherigen Abschnitt erwähnt, konnte die Schale mit der Dicke 0,3 mm bei der Fixierung an der Unterseite nicht geöffnet werden, da die Lasche mit nach oben gezogen wird. Wird die Packung an der Lasche der Schale fixiert, stellt sich hingegen ein Öffnungsverhalten ein, welches sich dem analytisch berechneten Öffnungskraftverlauf annähert. Es ist daher wichtig, bei der Konzeption und Optimierung von peelbaren Schalen die tatsächlichen Randbedingungen, wie den Fixierungsort, mit zu berücksichtigen.

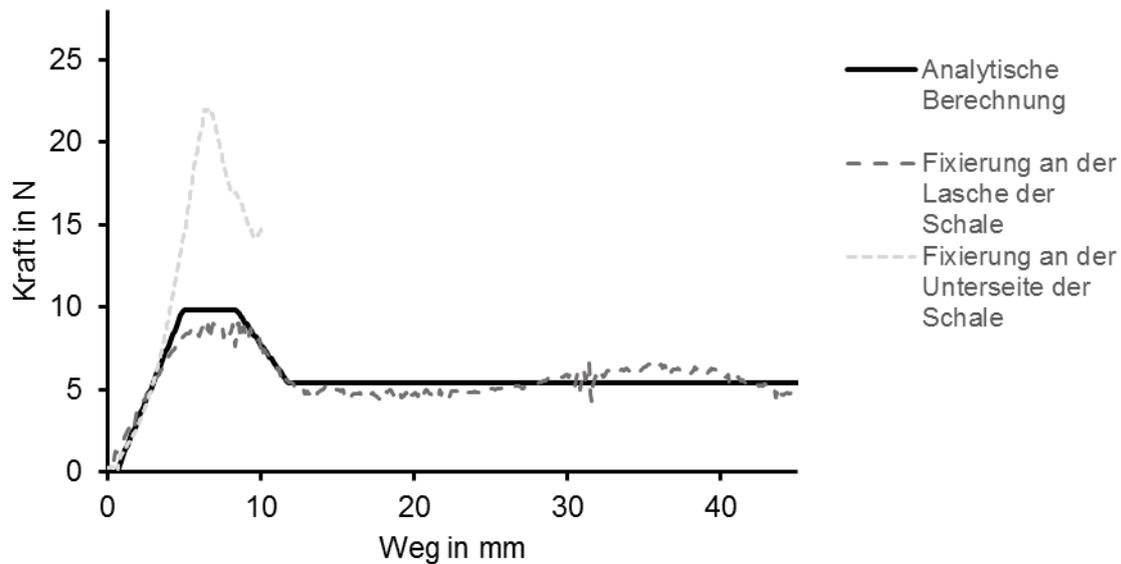


Abbildung 13: Vergleich der Öffnungskraft bei unterschiedlichen Fixierungsvarianten bei 0,3 mm Foliendicke der Schale

## 5 Zusammenfassung

Die Simulation des Öffnungsverhaltens peelbarer Verpackungen birgt einen erheblichen Vorteil bei der Konzeption und Optimierung verbraucherfreundlicher, peelbarer Verpackungen. Es wurde gezeigt, dass das Verhalten beim Öffnen prinzipiell abbildbar ist und die notwendigen Materialparameter durch standardisierte Versuche ermittelt werden können.

Deutlich wurde jedoch auch, dass zur Abbildung des Verhaltens kleine Elemente zur Vernetzung notwendig sind. Durch die Verwendung der Kohäsivelemente und der Methodik zur Ermittlung der Materialparameter kann der Trennvorgang weitestgehend auch bei grober Diskretisierung abgebildet werden. Trotz dessen steigt die Zahl der Knoten und Elemente bei Berechnung der ganzen Verpackung und damit die Rechenzeit schnell an, wodurch auf Ersatzmodelle zurückgegriffen werden muss. Zukünftig wird daher die Entwicklung von Ansätzen zur Abbildung des lokalen Trennvorganges bei groben Vernetzungen im Vordergrund stehen.

Für eine umfassendere Betrachtung ist es zukünftig zudem nötig, die Richtungsabhängigkeit der Siegelnahtfestigkeit mit zu berücksichtigen, da dieser Zusammenhang bereits an realen Siegelnähten nachgewiesen wurde. Zudem sind Einflüsse der Geschwindigkeit beim Peelvorgang bereits in [1] beschrieben. Folglich sollte das Kohäsivzonenmodell um diese Effekte erweitert werden. Anisotrope Materialeigenschaften der Folien wirken sich ebenso auf das Verformungsverhalten aus, wodurch gegebenenfalls die Öffnungskraft mit beeinflusst wird. Dem kann durch eine umfangreichere Materialcharakterisierung, welche längs und quer zur Maschinenlaufrichtung durchgeführt wird, Rechnung getragen werden.

Das beispielhaft aufgebaute Simulationsmodell einer Anrissgeometrie zeigte eine sehr gute Übereinstimmung zur analytisch berechneten Öffnungskraft. Nachgewiesen wurde, dass die Beurteilung der Öffnungskraft unter dem Einfluss der Verformung der Verpackung notwendig ist. Insbesondere bei dünnen Schalen kann es dazu kommen, dass der Öffnungsvorgang vom Ort der Fixierung abhängig ist. Eine Untersuchung zu unterschiedlichen Öffnungsprinzipien bzw. Grifftechniken in der Simulation ist problemlos möglich, wodurch verschiedene Szenarien schnell verglichen werden können.

Zukünftig wird der bereits erwähnte Zielkonflikt zwischen dem leichten Öffnen und der (transport-)sicher verschlossenen Verpackung mit betrachtet werden müssen. Mit dem beschriebenen Vorgehen ist es möglich, das Öffnungsverhalten der Schalen auch bei externen Belastungen beispielsweise während Transport- und Lagerprozessen zu beurteilen. Weiterhin eröffnet eine Übertragung der Methodik auf flexible Packmittel, wie Beutel, weitere Anwendungsfelder.

## Literaturverzeichnis

- [1] KIESE, Roland: *Predetermination of Opening Forces for Peelable Packages considering material- and testparameters* (TAPPI PLACE). Basel, 23.05.2017
- [2] KIESE, Roland ; SCHREIB, Ina ; ASTURIAS, Marta ; REINCKE, Katrin: *Methode zur Vorausberechnung der Öffnungskraft peelbarer Verpackungen*. In: *Verpackungs-Rundschau* (2017), Nr. 10, S. 56–57
- [3] SCHREIB, Ina ; LIEBMANN, Andrea: *IVLV, Merkblatt No. 106 : Guideline für die Gestaltung von peelbaren Verpackungen unter dem Gesichtspunkt „Easy Opening“*
- [4] GEIBLER, Gordon ; KALISKE, Michael ; NASE, Michael ; GRELLMANN, Wolfgang: *Peel process simulation of sealed polymeric film computational modelling of experimental results*. In: *Engineering Computations* 24 (2007), Nr. 6, S. 586–607 – Überprüfungsdatum 2017-03-01
- [5] YANG, Yabin ; ZENG, Pan ; LEI, Liping: *Numerical simulation study of the T-peel behavior of coated fabric films used in inflatable structures*. In: *Journal of Applied Polymer Science* 132 (2015), Nr. 3, n/a-n/a. URL <http://doi.wiley.com/10.1002/app.41299> – Überprüfungsdatum 2017-03-01
- [6] HOLMQVIST, Christian ; BRUCE, Hanna: *Modelling adhesion in packaging materials*. URL <http://lup.lub.lu.se/student-papers/record/4195162/file/4195163.pdf>
- [7] ERHART, Tobias ; HAUFE, André: *Möglichkeiten zur Modellierung von Kohäsivverbindungen in LS-DYNA* (2009 German LS-DYNA Update Forum). 2009
- [8] FEUCHT, M. ; HAUFE, A. ; PIETSCH, G.: *Modelling of adhesive bonding in crash simulation* (6th LSDYNA-Forum). Frankenthal, 2007
- [9] GEIBLER, Gordon ; KALISKE, Michael ; NASE, Michael ; GRELLMANN, Wolfgang: *Peel process simulation of sealed polymeric film computational modelling of experimental results*. In: *Engineering Computations* 24 (2007), Nr. 6, S. 586–607
- [10] GRAF, Tobias ; HAUFE, André ; ANDRADE, Filipe: *Adhesives modeling with LS-DYNA: Recent developments and future work* (Nordic LS-DYNA Forum 2014)