**1**

Ich danke Ihnen für die Einleitung. Ich wünsche allen einen guten Tag. Heute spreche ich über meine Doktorarbeit. In dieser habe ich mich mit dem Thema “Numerische Simulation der Delamination von faserverstärkten Kunststoffschalenstrukturen auseinandergesetzt. Die Simulation wird unter Verwendung von erweiterte Finite-Elemente-Methode durchgeführt.

Diese Doktorarbeit wurde mit Unterstützung von Professor Wilhelm Rust und Professor Peter Wriggers am Institut für Kontinuumsmechanik verfasst.

**2**

Der Aufbau meiner Präsentation sieht wie folgt aus:

Zuerst gebe ich Ihnen eine Einleitung in die Thematik der Faserverbundwerkstoffe. In dieser möchte ich Ihnen einige Arten des Materialversagens und die Gründe für die Delamination präsentieren.

Als zweites möchte ich Ihnen die Motivation für die Untersuchung der Delamination aufzeigen.

Danach präsentiere ich Ihnen die in dieser Arbeit entwickelten Ansätze im Detail. Die Verifikation dieser theoretischen Ansätze werde ich mit Ihnen im nachfolgenden Abschnitt besprechen.

Im Folgenden stelle ich allgemeine Beispiele von Delaminationssimulationen in Schalenstrukturen vor. Schließlich werde ich Ihnen mein Ergebnis schildern und mit einem Ausblick abschließen.

**3**

Faserverbundwerkstoffe bestehen aus mehreren Lagen mit verschiedenen Stapelfolgen. Jede Schicht besteht aus Fasern und einer Matrix. Die Fasern können im Bezug zum Hauptkoordinatensystem in verschiedenen Winkeln angeordnet werden. Weiterhin können die einzelnen Schichten unterschiedliche Materialeigenschaften besitzen.

**4**

Wie in allen Materialien treten in Faserverbundwerkstoffen ebenfalls Fehler auf. Das Materialversagen dieser Werkstoffe ist besonders in der Luftfahrtindustrie von großer Bedeutung.

**5**

Das Materialversagen wird folgendermaßen unterschieden:

• Intralaminares Versagen und • Interlaminares Versagen

Intralaminares Versagen bezieht sich auf die Festigkeit der Materialien im makroskopischen Maßstab. Deshalb werden Faserbrüche und Matrixrisse in diese Klasse des Versagens eingeordnet.

**6**

Interlaminares Versagen ist ziemlich komplex. Es bezieht sich auf Schäden die innerhalb der Interface-Region auftreten. Die Festigkeit zwischen zwei Kontaktflächen ist geringer, als die der einzelnen Schichten. Daher ist dies die Hauptursache für das Versagen von Faserverbundwerkstoffen.

Die Delamination ist eine Form des interlaminaren Versagens. Delamination ist definiert als die Trennung der Schichten während eines Belastungsvorganges.

Dieser Vorgang ist hier auf dem rechten Bild zu sehen. Das Ziel dieser Doktorarbeit war die numerische Simulation dieses Phänomens.

Die Simulation umfasst die Identifizierung der Stellen an denen potentiell Delamination auftreten kann. Weiterhin kann mit dieser der Fortschritt der Delamination präzise beobachtet werden.

**7**

Wie schon erwähnt, ist Delamination die Trennung der Schichten in der Interface-Region. Es gibt drei wesentliche Gründe für dieses Phänomen:

Erstens, die Stoßbelastung. Die Stoßbelastungen verursachen Zugspannungen innerhalb der Interface-Region. Diese Kräfte führen zur Trennung der Schichten.

Zweitens, der Modus der Belastung. Bei den unterschiedlichen Belastungsmodi treten Biegemomente auf. Folglich werden Quernormalspannungen induziert. Dieses Phänomen führt ebenfalls zur Delamination.

Drittens, das Wachstum der interlaminaren Spannungen. Dieses Wachstum ist bei der Delaminationsanalyse sehr wichtig.

In mehrschichtigen Verbundwerkstoffen können Materialien mit verschiedenen Materialeigenschaften und Faserwinkeln verwendet werden.

Somit ist das Verhalten jeder Lage bei gleicher Belastung unterschiedlich. Dies gilt ebenfalls für die innere Spannung.

Die Erzeugung von Scherkräften sorgt hier für die Erhaltung des Gleichgewichtszustandes. Diese Scherkräfte nehmen in Richtung des der Laminatgrenzen zu. In diesem Bereich tritt dann die Delamination auf.

**8**

In diesem Abschnitt möchte ich Ihnen die Motivation und das Ziel dieses Projektes vorstellen.

Es sind drei Haupttheorien erforderlich, um die Delamination der Schalenstrukturen zu analysieren:

Erstens, eine Theorie zur effektiven Schalenstruktursimulation.

Zweitens, eine Laminattheorie zur Modellierung der Laminatstrukturen.

Drittens, eine Theorie um den Beginn und das Wachstum der Delamination zu simulieren.

All die genannten Theorien wurden in dieser Arbeit entwickelt. Wir werden im Abschnitt mit den Formulierungen auf die genauen Details zu sprechen kommen.

**9**

In der Literatur finden sich viele Formulierungen für Schalenstrukturen. Diese sind in drei Kategorien eingeteilt:

Achsensymmetrische Schalenelemente, Allgemeine Schalenelemente, und Schalen-Facetten-Elemente.

In diesen Arbeit ist die Theorie der Schalen-Facetten-Elemente abgebildet. Mit dieser können die physikalischen Eigenschaften angenähert werden.

**10**

In allen Laminat-Theorien wird das Verhalten der Strukturen im Bezug auf die mittlere Ebene des Schalenelements vorhergesagt.

Das Verschiebungsfeld wird ebenfalls im Bezug auf die mittlere Ebene des Schalenelements definiert.

Dieses Verschiebungsfeld kann linear oder in einer höheren Ordnung verlaufen. In dieser wissenschaftlichen Arbeit wird der lineare Verlauf des Verschiebungsfeldes bestimmt. Ein solcher Verlauf wird First-Order-Shear-Deformation Theorie genannt.

**11**

Nun möchte ich Ihnen die entwickelten Ansatzfunktionen vorstellen.

Zuerst stelle ich den Ansatz der Schalen-Facetten-Elemente vor. Bei diesem werden zwei Koordinatensysteme verwendet:

Ein lokales und ein globales kartesisches Koordinatensystem. Die lokalen Koordinaten sind auf die einzelnen Elemente bezogen. Die globalen Koordinaten beziehen sich auf die übergeordnete Ebene.

Alle diese Ansätze werden im lokalen Koordinatensystem entwickelt. Danach werden sie in das globale Koordinatensystem transformiert.

Das Verschiebungsfeld verhält sich über die gesamte Laminatschicht hindurch linear.

Das Verschiebungsfeld können wir mit fünf Variablen beschreiben: Drei für die Verschiebungen und zwei für die Verdrehungen. Diese Variablen beziehen sich auf der Schalenreferenzfläche. Bilineare Formfunktionen werden zur Beschreibung des Verschiebungsfeldes herangezogen.

Somit hat jeder Knoten fünf Freiheitsgrade.

**12**

Durch Einsetzen des Verschiebungsfeldes in den "Green-strain" Tensor und unter Berücksichtigung aller nichtlinearen Bedingungen erhalten wir das Dehnungsfeld.

Unter Verwendung des Werkstoffgesetzes orthotroper Materialien bestimmen wir nun das Spannungsfeld. Das Werkstoffgesetz wird über den Faserwinkel und die Materialeigenschaften jeder Lage definiert.

**13**

Die Schubspannungsverteilung muss über den gesamten Querschnitt des Laminats Stückweise parabolisch verlaufen.

Basierend auf der "First-Order Shear Deformation Theory" ist diese in jeder Lage konstant.

Darüber hinaus ist die Spannung an den freien Oberflächen ungleich null. Dies ist Physikalisch nicht möglich.

Darum wird ein Schubkorrekturfaktor definiert. Dieser Faktor wird zur Fehlerreduzierung mit der Schubspannung multipliziert. Dieser Faktor basiert auf der Differenz zwischen der Verzerrungsenergie der elastischen Verformung und der Verzerrungsenergie der Laminattheorie.

**14**

Die First-Order Shear Deformation Theory ist eine Theorie niederer Ordnung. Diese Formulierung kann nicht bei dünnen Laminaten unter Biegelast verwendet werden. Aus diesem Grund müssen wir eine Locking beseitigen.

Die „Assumed Strain“ Formulierung wird in diesem Fall angewandt. In diesem Verfahren werden vier Probepunkte im Zentrum der Elementränder definiert.

Dann wird eine neue lineare Querschubverzerrungen zwischen diesen Punkten definiert. Durch die Annahme dieser Querschubverzerrungen kann die Locking entfernt werden.

**15**

Als nächstes werden der Kraft- und der Verschiebungsvektor in das globale Koordinatensystem überführt. Die Transformationsmatrix kann durch die Bestimmung des Kosinus berechnet werden. Dieser Winkel stellt den Bezug zwischen dem lokalen und dem globalen Koordinatensystem dar.

Durch die Transformation der Gleichung in das globale Koordinatensystem wird ein neuer Freiheitsgrad erzeugt. Dieser ist ein Rotationsfreiheitsgrad in Z-Richtung. So werden im Bezug auf den Freiheitsgrad neue Steifigkeitskomponenten erzeugt.

**16**

In co-planaren Elementen ist die Differenz zwischen den senkrecht zur Oberfläche stehenden Vektoren benachbarter Elemente vernachlässigbar. Darum erhalten wir keine Steifigkeit im Bezug auf diesen Freiheitsgrad.

In dieser Arbeit werden zwei Methoden zur Lösung des Problems betrachtet:

- Die Zuordnung eines fiktiven Steifigkeitswerts in co-planaren Elementen

- Die Bestimmung des „Drilling“ Freiheitsgrades

**17**

Der „Drilling“ Freiheitsgrad kann zur Erzeugung aller Elemente verwendet werden. Bei diesem Verfahren gibt es einen Zusammenhang zwischen dem Drehfreiheitsgrad und Elementrotation.

Manchmal befinden sich die erzeugten Knoten nicht der gleichen Ebene. In diesem Fall müssen die Verdrehungen oder Verschiebungen solcher Elemente modifiziert werden.

Hier wenden wir die Modifikationen auf die Verdrehungen an. Die Elemente werden unter der Verwendung eines entsprechenden Offsets auf eine gemeinsame Ebene verschoben.

**18**

Wir erhalten die Gleichgewichtsgleichung durch Anwendung des Prinzips der virtuellen Arbeit. Der Newton-Raphson-Algorithmus wird zur Lösung der nichtlinearen Gleichungen verwendet. So können wir die Tangentensteifigkeitsmatrix ableiten.

Die Tangentensteifigkeitsmatrix besteht aus drei Komponenten:

- Die lineare Steifigkeitsmatrix

- Die geometrische Steifigkeitsmatrix

- Und die auf die Funktion der Deformation bezogene Steifigkeit.

Im nächsten Schritt Analysieren wir die Genauigkeit dieses Ansatzes.

**19**

Es wird eine Punktlast im Zentrum einer schwenkbaren zylindrischen Schale aufgebracht. Die Isotropie- und Verbundeigenschaften werden unabhängig voneinander betrachtet.

Die Ergebnisgenauigkeit wird nun mit dem Referenzwert verglichen.

**20**

Auf der linken Seite sehen Sie das Last-Verschiebungs-Diagramm der simulierten Schalen. Die Ergebnisse stimmen sehr gut mit den Referenzwerten überein. Die Ergebnisse sind auf der rechten Seite als Animation zu sehen.

**21**

Bei keiner der Laminat-Theorien wird eine Diskontinuität des Verschiebungsfeldes vorausgesetzt. Daher ist eine Simulation der Delaminaton mit dieser Grundlage nicht möglich.

Ein gemeinsames Konzept zur Modellierung des diskontinuierlichen Bereiches stellt die Verwendung von zwei Schalenelementen auf der Ebene der auftretenden Diskontinuität dar.

In dieser Arbeit wird diese Methode umgangen.

Stattdessen wird die erweiterte Finite-Elemente-Methode zur Abbildung des diskontinuierlichen Bereiches herangezogen. Die Diskontinuität kann durch die Definition zusätzlicher Freiheitsgrade ausgebildet werden.

**22**

Mit der Standard Finite-Elemente-Methode wird das Verschiebungsfeld mithilfe der Standardfreiheitsgrade angenähert. In der erweiterten Finite-Elemente-Methode werden neben den Standardfreiheitsgraden weitere zusätzliche Freiheitsgrade verwendet.

**23**

Die Simulation der drei wichtigsten Bereiche der Delamination muss in den Schalen durchgeführt werden. Diese Bereiche sind:

- Der untere Teilbereich, der oberer Teilbereich und die Interface-Region.

Dieser Ansatz muss die Fähigkeit besitzen die Reaktion dieser Bereiche vorherzusagen.

Durch die Anwendung von XFEM wird das neue Verschiebungsfeld bestimmt. Diesem Verschiebungsfeld werden weitere Verschiebungen und Verdrehungen hinzugefügt. Diese neuen Parameter können wir unter Zuhilfenahme der Heaviside-Schrittfunktion zur Simulation der Diskontinuität verwenden.

**24**

Die Heaviside-Schrittfunktion erhält die Werte Null oder Eins. Der Wert Eins bildet die Existenz einer Diskontinuität ab. (z\_d) gibt die Position der Diskontinuität an. Es trennt die oberen von den unteren Teilbereichen. Im unteren Teilbereich werden nur Standardvariablen verwendet. Im oberen Teilbereich werden die Standardvariablen und die erweiterten Variablen kombiniert verwendet.

**25**

Durch Einsetzen des Verschiebungsfelds in den "Green strain"-Tensor erhalten wir das Dehnungsfeld. Wir verwenden die Gleichungen höherer Ordnung, um die Reaktion der Schale in geometrisch nicht linearen Systemen vorherzusagen. Im Folgenden setzen wir das Dehnungsfeld in die Zustandsgleichung orthotroper Materialien ein und erhalten so das Spannungsfeld. Die Materialeigenschaften werden durch die Dicke eines jeden Teilbereiches integriert.

**26**

Wie beim Standard-Finite-Elemente-Ansatz müssen auch hier Modifikationen vorgenommen werden. Der Schubkorrekturfaktor wird jedem Teilbereich zugewiesen. Auch wird die angenommene „Assumed Strain“ Formulierung verwendet. Zusätzlich passen wir den Ansatz der Drillingsfreiheitsgrade in dem XFEM Ansatz an.

Zum Abschluss nehmen wir eine Transformation der Tangentensteifigkeitsmatrix in das globale Koordinatensystem vor. So können wir das strukturelle Verhalten der Schalen bei Delamination simulieren.

**27**

Die cohesive-Formulierung wird verwendet, um den Beginn und das Wachstum der Delamination zu simulieren. In diesem Ansatz ist der untersuchte Körper zunächst nicht kontinuierlich. Die cohesive-Formulierung wird auf die Interface-Region angewandt. So wird der Beginn der Delamination sowie das Wachstum durch diesen Ansatz erfasst.

**28**

Wir entwickeln nun drei Ansatzfunktionen für die Interface-Region:

- Das "Mixed-Mode-bilinear cohesive" Zonenmodell

- Das "Mixed-mode linear-exponentiell cohesive" Zonenmodell

- und einen Kontaktansatz

Diese Ansätze können durch einen Sprung in der Verschiebung der Teilbereiche implementiert werden. Ein solcher Sprung wird als Funktion erweiterten Verschiebung und Verdrehung im lokalen Koordinatensystem beschrieben.

**29**

Wir verwenden die cohesive-Formulierung, um das Auftreten und das Wachstum von Delamination zu simulieren. In der cohesive-Formulierung werden zwei Bereiche beschrieben: Ein linearer und ein Softening Bereich.

Der lineare Bereich wird anfangs zur Bindung der intrinsischen Risse verwendet. Zu diesem Zweck verwenden wir die größte "Penalty"-Steifigkeit.

Wenn das "onset" Delaminationskriterium erfüllt ist, wird der „Softening“ Bereich aktiviert. Im „Softening“ Bereich wird die Nachlassen der Reißfestigkeit simuliert. Wir verwenden hierfür einen Schädigungs-Entwicklungs-Parameter.

Wenn das Kriterium für das Delaminationswachstum erfüllt ist wird die cohesive-Formulierung entfernt. Anschließend bilden wir eine neue Delaminationsoberfläche.

**30**

In dieser Arbeit wird das "mixed-mode-Spannungs-Separations" Gesetz betrachtet. Es enthält die Interaktionen der Bruchmodi.

In der Mixed-Mode-cohesive-Formulierung werden die Mixed-Mode Kriterien für den Delaminationsbegin und Fortschritt übernommen. Darüber hinaus wird der daraus resultierende Verschiebungssprung verwendet. Das "mixed-mode Spannungs-Separations-Gesetz" ist im rechten Diagramm zu sehen.

**31**

Die Zustandsgleichung besteht aus drei Teilen: - Die lineare Zone - Die Softening Zone - Die Kontaktzone

Die Kriterien für den Delaminationsbeginn definieren die Grenzen der linearen und der Softening Systeme.

Der Kontaktansatz wird zur Vermeidung einer Durchdringung der inneren Teilbereiche herangezogen. Beim Anwenden der bilinearen Cohesive-Formulierung wird ein linearer Schädigungs-Entwicklungs-Parameter herangezogen.

**32**

Um die Delaminationsanalyse zu ermöglichen wird die Tangentensteifigkeit der Cohesive-Formulierung mit der diskontinuierlichen Schalenformulierung kombiniert. zur Lösungsfindung verwenden wir das Bogenlängen-Verfahren mit dem Full-Newton-Raphson-Algorithmus.

Die Cohesive-Formulierung hat ein Stabilitätsproblem. So ist eine konvergierende Lösung mit dieser Formulierung schwer zu erhalten. Hier wird der Einfluss des Integrationsschemas auf die Reduzierung des Schwingungsergebnisses untersucht. Daher werden die Gaußsche Quadratur, die Newton­Cotes und die Lobatto Quadratur Methoden unabhängig voneinander zur Berechnung der Tangentensteifigkeitsmatrix verwendet.

**33**

Zur Untersuchung der Genauigkeit der Cohesive-Formulierung werden numerische Tests durchgeführt.

Hier simulieren wir einen ENF Test. Dieser ist der Standard­ Test für einen Modus 2 Riss. Die Platte ist an beiden Enden, wie dargestellt, auf zwei Stützen gelagert.

In der Mitte wird eine Streckenlast aufgebracht.

**34**

Auf der Linken Seite ist das Last-verformungsdiagramm des ENF Test zu sehen.

Wir Vergleichen nun die Ergebnisse der verschiedenen Integrationsschemata mit den Referenzwerten.

Auf diesem Weg weisen wir die Genauigkeit der vorliegenden Ansätze zur Simulation eines Modus 2 Risses nach.

Hierbei stellen wir fest, dass die Lobatto Quadratur Methode das Integrationsschmemata mit den besten Ergebnissen ist.

Auf der rechten Seite ist die Animation der Delaminationsanalyse zu sehen.

**35**

Wie zuvor erwähnt hat die Cohesive-Formulierung ein Stabilitätsproblem. Um dieses Problem zu verringern wird ein exponentielles Softening Verhalten verwendet. Hierbei wird durch das exponentielle Softening Verhalten der „Softening„-bereich vergrößert. Dies wird in dem rechten Diagramm dargestellt.

Es wird daher zur Simulation des exponentiellen entfestigenden Verhaltens ein exponentieller Schädigungs-Entwicklungs-Parameter angewendet.

**36**

Wir betrachten den Double Cantilever Beam-Test. Wir wenden hier die "Mixed­-Mode" linear­-exponentielle Cohesive-Formulierung an.

Weiterhin führen wir an diese Stelle eine Analyse im geometrisch nichtlinearen Systeme durch.

Bei Betrachtung der Ergebnisse stellen wir fest, dass durch die Anwendung der geometrisch nicht linearen Funktionen kein Unterschied auftritt.

Die linear-­exponentielle Cohesive-Formulierung simuliert effektiv das Delaminationswachstum.

Im rechten Diagramm sind die Schwingungsergebnisse der Newton­-Cotes Integration hervorgehoben.

Die Lobatto Quadratur Integration wird mit weniger Schwingungen durchgeführt.

**37**

In der nichtlinearen Analyse kann eine innenliegende Durchdringung der einzelnen Teilbereiche auftreten. Dieser Fall kann nicht physikalisch interpretiert werden.

Daher sollte die Kontaktformulierung im diskontinuierlichen Ansatz von Schalenelementen angewendet werden.

Die Bedeutung des Einsatzes von Kontaktinformationen ist in den Abbildungen dargestellt.

Der Kontaktansatz wirkt nur in der Querrichtung.

**38**

Die wachsende interlaminare Spannung ist eine der Ursachen für Delamination.

Daher können wir die Werte dieser Spannung als "onset"-Kriterium für den Delaminationsbeginn verwenden.

In der first-order shear deformation theory wird angenommen, dass die Querschubspannungen in jeder Laminatlage konstant sind.

Weiterhin werden die Quernormalspannungen nicht berücksichtigt.

Die interlaminare Spannung kann im Post-processing berechnet werden.

In dieser Arbeit möchte ich zwei Lösungsmethoden vorstellen:

- Die Berechnung der Interlaminarenspannung unter Verwendung des Interfacemodells;

- Die Berechnung der Interlaminarenspannung unter Verwendung der Elastizitäts-Gleichgewichtsgleichung.

**39**

Die interlaminaren Spannungen erhalten wir durch Anwendung des linearen-Interface Ansatzes in Form von Zugkraftvektoren.

Die interlaminaren Spannungen die mit dieser Methode berechnet werden sind sehr präzise.

Um die interlaminare Verteilung über die Bauteildicke zu erhalten muss der Ansatz an jeder Interface-Region angewandt werden. Aus diesem Grund ist dieser Ansatz sehr Rechenintensiv.

**40**

Die interlaminaren Spannungen können auch durch die Gleichgewichtsgleichung bestimmt werden.

Der Rechenaufwand für die Anwendung dieses Verfahren ist gering. Darüber hinaus werden die interlaminaren Spannungen durch Anwendung der Standart-Finite-Elemente Methode berechnet.

Für dieses Verfahren wird die zweite Ableitung der bilinearen Formfunktion benötigt.

Jedoch haben diese Ableitungen in der Regel den Wert Null.

Aus diesem Grund kann die Gleichung nicht auf direktem Wege berechnet werden.

Auf der nächsten Folie möchte ich nun die numerische Methode zur Berechnung dieser Gleichungen erörtern.

**41**

Die Verschiebungsverteilung ist Abschnittsweise linear.

Wir erhalten so eine diskontinuierliche Spannungsverteilung.

Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit die Spannungsverteilung geglättet.

Dadurch erhalten wir den Mittelwert der Knotenspannungen.

Nun können die Ableitungen der Formfunktionen in die Gleichgewichtsgleichung eingesetzt und berechnet werden.

Weiterhin erhalten wir die Querschubspannungen an den Integrationspunkten.

Als nächstes glätten wir die Querschubspannungen.

Dann berechnen wir unter Zuhilfenahme der Gleichgewichtsgleichung in Querrichtung die Quernormalspannungsverteilung an den Integrationspunkten.

**42**

Zur Untersuchung der Genauigkeit der vorgestellten Methoden, zur Bestimmung der interlaminaren Spannung, wird eine unendlich große Verbundplatte mit kreuzender Faserrichtung simuliert.

Die Platte wird teilweise Quer zur Oberfläche belastet.

Die Randbedingungen werden einfach der Länge nach angewandt.

Die interlaminaren Spannungen werden im geometrisch nichtlinearen Bereich berechnet.

**43**

Wir vergleichen nun die Verteilung der nichtlinearen interlaminaren Schubspannung mit den Referenzwerten.

Die vorhergesagten Ergebnisse stimmen sehr gut mit der Referenz überein.

Allerdings ist der Rechenaufwand bei der Anwendung des Interfacemodells hoch.

**44**

Die allgemeine Methode zur Analyse der Delamination, ist die unabhängige Simulation jeder einzelnen Lage. Auf diese Weise sind alle Interface-Regionen diskontinuierlich. Die cohesive-Formulierung wird auf alle Interface-Regionen angewandt, um den Beginn der Delamination und dessen Wachstum beobachten zu können. Dieses Verfahren ist jedoch sehr rechenintensiv.

In dieser Dissertation startet die Simulation mit einer intakten Komposite-Schale. So wird eine Diskontinuität am Beginn der Simulation vermieden.

Die cohesive-Formulierung wird nur teilweise auf potentielle Interface-Regionen angewandt. Dies senkt den Rechenaufwand. Hierfür möchte ich nun einen neuen Algorithmus vorschlagen.

**45**

Das Ziel dieser Arbeit ist es die cohesive-Formulierung ­ und diskontinuierliche Schalenformulierung ausschließlich an den Interfaces und Bereichen an denen die Gefahr von Delamination besteht zu implantieren.

So kann der Rechenaufwand reduziert werden.

Das Vorgehen in den Lösungsalgorithmen ist wie folgt:

1. Die interlaminaren Spannungen werden nach jeder konvergenten Laststufe berechnet.

Die Spannungen werden mit der Gleichgewichtsgeleichung berechnet.

2. Die Kriterien für den Beginn der Delamination werden überprüft.

Hierbei werden die Bereich und die Interfaces für die eine Gefahr der Delamination besteht erkannt.

3. Die diskontinuierliche Schalenformulierung und der Mixed-­Mode cohesive-Formulierung werden an den betroffenen Stellen implementiert.

4. Während des Bruchprozesses wird eine Veränderung der Ansatzfunktionen von den umgebenen Elementen zum diskontinuierlichen Schalenmodell und zur cohesive-Formulierung vorgenommen.

Durch befolgen des genannten Algorithmus wird der Rechenaufwand reduziert.

**46**

Platten- und Schalenstrukturen sind anfällig für Beulen.

Wenn die axiale Last nicht durch die Membrankomponenten gestützt werden kann, wird die Belastung in eine Biegung umgewandelt.

Dies führt zum Beulen der Struktur.

Das Beulen kann lokal oder global stattfinden.

Die Pre-­delaminierte Region beult lokal. Der Delaminationsfehler kann daher ebenfalls durch das Phänomen des Beulungs verursacht werden.

Aus diesem Grund sind die Wechselwirkungen dieser Phänomene von Bedeutung.

Es werden zwei Typen der Beulanalyse durchgeführt:

Die lineare und die nichtlineare Beulanalyse.

**47**

Bei der linearen Beulalyse wird ein Eigenwertproblem gelöst.

Die Eigenwerte werden zur Bestimmung der kritischen Belastung benötigt. Mit den Eigenvektoren können wir die Modi der Beulung erhalten.

Betrachten wir nun die nicht lineare Beulanalyse.

Wir benötigen die nichtlineare Beulanalyse weil:

- Platten und Schalenstrukturen die geometrisch nichtlineare Systeme durchlaufen

- die lineare Beulanalyse mit dem Kontakt oder Interface-Formulierung nicht geeignet ist

- Einige lineare Beulmodi nicht physikalisch interpretiert werden können.

Bei der nicht-linearen Beulanalyse können Verzweigungspunkte auftreten. Allerdings erhalten wir in der Beulungsanalyse bei Berücksichtigung von Imperfektionen ein abweichendes (ابوایشندس) Nachbeulungsverhalten.

**48**

Die Nachbeulung können wir in der Delaminationsbeulanalyse mit dem folgendem Algorithmus nachvollziehen.

Wir implementieren nun zwei Haupttypen von Imperfektionen in den Algorithmus:

Die geometrische Imperfektione und die Imperfektion des Kraft-Typs.

Die geometrische Imperfektionen wird von der Beulmodi-Form abgeleitet.

Die Imperfektionen der Kraft-Typen werden da mit ein Beulform der Krafttype aufgebraucht.

**49**

Hier wird die nicht­lineare Beul-Delaminationsanalyse durchgeführt. Wir simulieren eine eingespannte Platte mit einer zentral gelegenen Delamination.

Die Platte unterliegt einer axialen Druckbelastung. Wir wenden ebenfalls den zuvor erläuterten nicht-linearen Beulalgorithmus an.

**50**

Es wird eine gute Über einstimmung mit dem Referenzwert erreicht.

Zunächst wölbt sich die Platte nach außen.

Dann stellen wir ein Delaminationsswachstum fest.

Die abfallenden Werte der maximalen Last sind das Ergebnis der Delamination nach dem Beulphänomen.

Die Animation der nicht-linearen Delaminationsbeulanalyse ist im der Video zu sehen.

**51**

Das letzte Beispiel ist der Delaminationsanalyse eines eingespannten Verbundzylinders unter Einzellast gewidmet.

Das Ziel ist es die unterschiedlichen Stellen der Delamination während des Lastaufbringungsvorganges zu finden.

Wir starten die Simulation mit einer intakten Verbundschale.

Es werden nun drei verschiedene Schichten der Lagen simuliert.

Die Analyse erfolgt im geometrisch nicht-linearen Bereich.

**52**

Wir erfassen die Delamination an der Lastaufbringungsstelle in einer zylindrischen Schale mit einem Faserwinkel von null Grad.

In anderen Fällen wird die Delamination an anderer Stelle eingeleitet.

Insbesondere bei der dritten und fünften Laminatlage wird eine Delamination erkannt.

In Verbund mit einem von Faserwinkel null Grad startet die Delamination bei höheren Lastamplituden.

Die Bereiche der Delamination sind im rechten Diagramm dargestellt.

Wir vergleichen die Last-Verschiebungsdiagramme mit einer Schale die keine Beschädigung aufweist.

Wir stellen eine Differenz zwischen der Reaktion der beschädigten und der intakten Schale fest.

**53**

Die Ergebnisse der Arbeit sind wie folgt aufgeführt:

- XFEM kann effektiv zur Modellierung der Diskontinuität an Gränzflächen von 4­-Knoten Elementen verwendet werden.

- Mit dem XFEM Verfahren kann die Simulation von Teilbereichen und die Ausrichtung der Netzsschemata eliminiert werden.

- Die Anwendung des diskontinuierlichen Schalenansatzes und cohesive-Formulierung kann lokal durchgeführt werden.

- Die Wahl eines Integrationsverfahrens für die cohesive-Formulierung hat signifikanten Einfluss auf die Reduzierung von Schwingungen.

- Das vorgestellte Modell kann für die Mixed­-Mode-­Delaminierungsanalyse verwendet werden.

- Wir konnten die Genauigkeit des exponentiellen Softening-Verhaltens bei der Vorhersage von Delaminationswachstum nachweisen.

**54**

- Die Ergebnisse der einzelnen Ansätze korrelieren sehr gut mit den experimentellen und den numerischen Ergebnissen aus der Literatur.

- Der Ansatz ist in der Lage die Art des Delaminationsversagens in intakten Schalen unter zunehmender Belastung zu untersuchen.

- Die Delaminationsanalyse kann mithilfe einer intakten Schale gestartet werden.

- Die Delaminationsfront wird ohne eine erneute Vernetzung gebildet.

- Der Numerische- und der Simulationsaufwand werden während der Durchführung der Delaminationsanalyse reduziert.

**55**

Ausblick:

- Die Simulation der Matrix­Brüche oder Faser-­Matrix-­Ablösung können berücksichtigt werden.

- Das Modell kann für die Simulation mehrerer Delaminationen verbessert werden. Daher kann das Vereinigen von Delaminationen simuliert werden.

- Ein stabiles Verfahren kann zur Simulation des Bruchproesses verwendet werden.

- Der Ansatz kann für große Drehungen modifiziert werden.

**56**

Vielen Dank für ihre Aufmerksamkeit!