

NICHTLINEAR STATISCHE BERECHNUNGEN AN MINI-TEDS FÜR DEN AIRBUS A340

F. Wagner
ICS Solutions GbR
D-63225 Langen

B. Bautz
EADS Deutschland GmbH
D-81663 München

Kurzfassung

Innerhalb des von der Europäischen Gemeinschaft geförderten fünften Rahmenprogramms werden im Projekt AWIATOR neue Technologien entwickelt, um unter anderem das Auftriebsverhalten von Flugzeugen zu verbessern und die Geräuschentwicklung zu reduzieren. Dazu werden in mehreren Einzelprojekten unterschiedliche Methoden und Komponenten analysiert, die im Jahr 2005 im Flugexperiment an einem Airbus A340 unter Praxisbedingungen getestet werden sollen. Eine dieser neuen Komponenten sind die von Airbus Deutschland in Zusammenarbeit mit dem EADS Corporate Research Center Deutschland entwickelten Mini-TEDs („Mini Trailing Edge Devices“). Dabei handelt es sich um zusätzliche Klappen, die in die Landeklappen integriert werden und die je nach Flugzustand bis zu 90° angestellt werden können. Hierdurch wird das Auftriebs- und Widerstandsverhalten der Klappe günstig beeinflusst.

In dieser Veröffentlichung wird ein Modell zur Durchführung nichtlinear statischer Berechnungen an Mini-TEDs für den Airbus A340 vorgestellt. Als Simulationsumgebung wird das Programmpaket MSC.Marc™ gewählt, da eine Vielzahl geometrischer Nichtlinearitäten sowie der Kontakt zwischen einzelnen Komponenten berücksichtigt werden müssen. Um die Analyse effizient zu gestalten, wird ein Teil der Prozesse über MSC.Marc™ Anwenderprogramme (Usersubroutines) gesteuert.

Nach einer kurzen Vorstellung des Funktionsprinzips der Mini-TEDs und der relevanten Modellierungsdetails werden die Simulationmöglichkeiten des erstellten Modells anhand einiger ausgewählter Ergebnisse demonstriert.

Stichworte:

Projekt AWIATOR, Mini-TEDs, Simulation, Finite Elemente, nichtlineare Statik, geometrische Nichtlinearitäten, Kontakt, Anwenderprogramme

1 Einleitung

Aufgrund des stetig wachsenden Luftverkehrs gewinnt die Betrachtung der Lärmemission eines Flugzeuges zunehmend an Bedeutung. Zukünftige Lärmschutzregularien werden eine deutliche Reduktion des abgestrahlten Flugzeuglärms notwendig machen, um finanzielle Einbußen durch erhöhte Start- und Landegeühren zu verhindern. Neben der Möglichkeit, die Leistung der Schallquelle zu reduzieren, bietet es sich an, auf die Entfernung zur Schallquelle Einfluß zu nehmen. Dieses Prinzip soll durch die Einführung steilerer An- und Abflugwinkel umgesetzt

werden, wodurch sich die mit geringer Höhe überflogenen Gebiete reduzieren. Die dazu notwendige Beeinflussung der Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte soll mit Hilfe eines zusätzlichen Systems, den sogenannten Mini-TEDs, ermöglicht werden, die zur Zeit von Airbus Deutschland in Zusammenarbeit mit dem EADS Corporate Research Center Deutschland entwickelt werden. Weitere Einsatzmöglichkeiten der Mini-TEDs sind die Rollsteuerung, eine kontinuierliche Anpassung des Flugzeuges an den zugewiesenen Flight Level und die Verwendung zur Böenabminderung in Verbindung mit einem Böensensor.

Bei einer Mini-TED handelt es sich um ein monolithisches CFK-Bauteil, das über faserintegrierte Scharniere an die Hinterkante der Landeklappe angebunden wird. Beim Ausschlag von bis zu 90° entstehen Zwangskräfte in den Scharnieren, die aus der Vorkrümmung der Landeklappe und deren Durchbiegung aufgrund der Luftlasten resultieren. Die Berechnung dieser Kräfte, unter der Berücksichtigung aller geometrischen Nichtlinearitäten, ist das wesentliche Ziel der Arbeit. Dabei werden eine in Spannweitenrichtung zweifach geteilte und eine ungeteilte Variante einer Mini-TED miteinander verglichen.

2 Modellbildung

Ziel der hier vorgestellten Modellbildung ist es, verschiedene Varianten einer Mini-TED (geteilt und durchgängig) bei unterschiedlichen Lastzuständen nichtlinear statisch zu analysieren und Parameterstudien durchführen zu können. Dabei muß das Modell so erstellt werden, daß zum einen vertretbare Rechenzeiten realisiert, zum anderen jedoch alle relevanten Nichtlinearitäten berücksichtigt werden können.

Die Hinterkante der hier untersuchten inneren Landeklappe des Airbus A340 weist, wie in Bild 1 zu sehen, in Spannweitenrichtung einen sogenannten W-Schlag auf, der zu einer Vorkrümmung der Mini-TED führt.

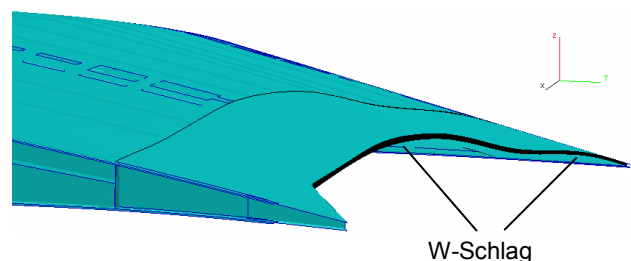


Bild 1: W-Schlag der Hinterkante der inneren Landeklappe des A340

Um diesen Einfluß in die Ergebnisse einbeziehen zu können, ist es notwendig, die Montage der anfänglich ebenen Mini-TED und den Kontakt zur Landeklappe ebenfalls zu simulieren. Darüber hinaus müssen während des Schwenkens der Mini-TED die großen Rotationen, der zunehmende Steifigkeitseinfluß auf die Hinterkante der Landeklappe und die Änderung des Angriffswinkels der Luftlasten als weitere, geometrische Nichtlinearitäten vollständig abgebildet werden (siehe [1], [7]).

2.1 Finite Elemente Modell

Als Basis für die Modellerstellung wird ein MSC.Nastran™ Modell der inneren Landeklappe ohne Mini-TED eines Airbus A340 verwendet. Da dieses Modell aufgrund seines hohen Detaillierungsgrades und der damit verbundenen großen Anzahl an Freiheitsgraden nicht für eine nichtlineare Analyse geeignet ist, wird es soweit vereinfacht, daß nur die in Bild 2 gekennzeichnete Hinterkante der Landeklappe voll ausmodelliert wird. Zur Modellgenerierung werden die beiden Preprozessoren MSC.Patran™ beziehungsweise MSC.Marc/Mentat™ eingesetzt, wobei der Datenaustausch über die MSC.Patran™ Neutral File Schnittstelle erfolgt. Darüber hinaus wird ein Teil der Informationen mittels MATLAB® Programmen direkt aus der MSC.Nastran™ Eingabedatei entnommen (siehe [4]) und in MSC.Marc/Mentat™ Procedure Files umgewandelt.

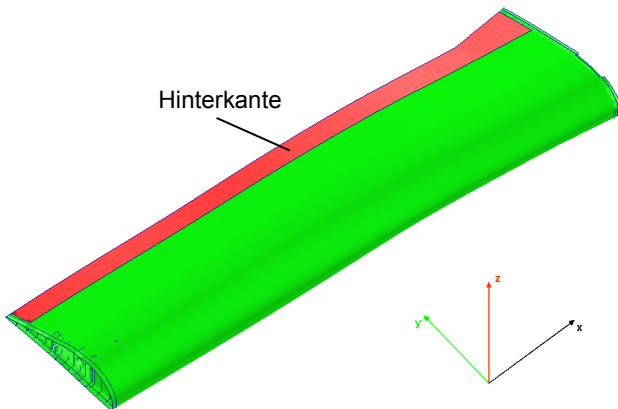


Bild 2: FE-Modell der inneren Landeklappe des A340

Der Einfluß der übrigen Komponenten (Centre Section und Vorderkante) wird durch einen Ersatzbalken in der Schubmittelpunktslinie der Landeklappe mit variabler Steifigkeit in Spannweitenrichtung idealisiert. Die Anbindung der Schubmittelpunktslinie an die Hinterkante erfolgt über starre Zeiger. Bild 3 zeigt das abgeleitete nichtlineare Modell der Landeklappe, wobei die Hinterkante als Schnitt dargestellt ist, um den inneren Aufbau zu verdeutlichen.

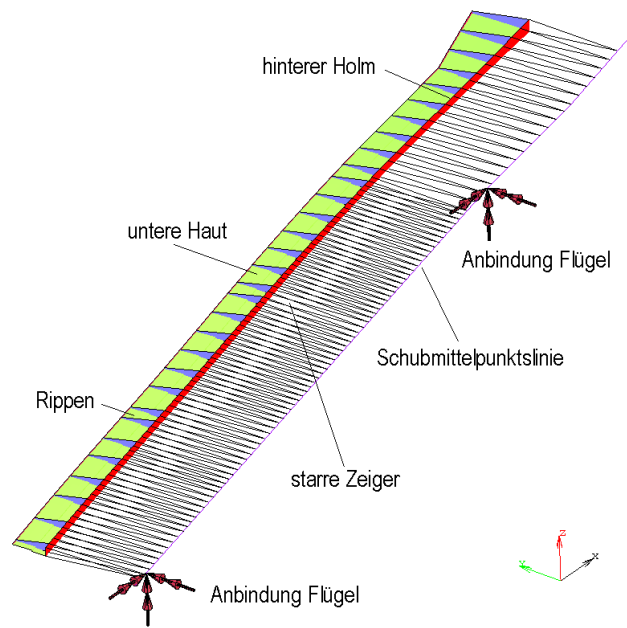


Bild 3: Nichtlineares FE-Modell der Landeklappe

Die Rippen der Hinterkante sind dabei so angeordnet, daß sie mit der Position eines Scharniers zwischen der Mini-TED und der Hinterkante zusammenfallen. Aufgrund des W-Schlages der Landeklappenhinterkante des Airbus A340 können jedoch weder die Mini-TED noch die Scharniere in ihrer Einbaulage modelliert werden, da die Vorspannung der Anfangs ebenen Mini-TED mitberücksichtigt werden muß. Bild 4 zeigt exemplarisch einen Schnitt durch ein Scharnier der Mini-TED.

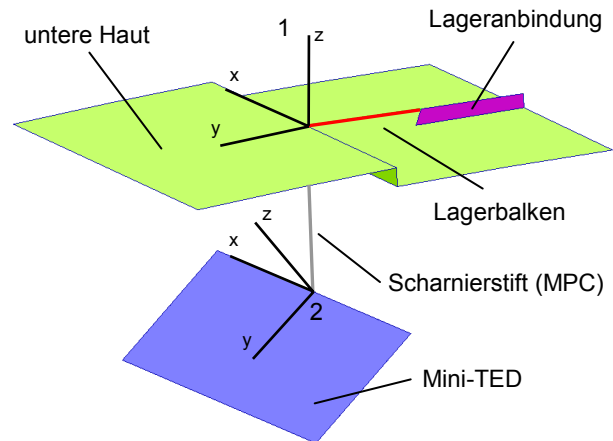


Bild 4: Modellierung eines Scharniers

Das Scharnier besteht auf der Seite der Hinterkante aus einem Kragbalken, der über Nieten mit der unteren Haut verbunden ist. Die Abbildung des Scharnierstiftes erfolgt über eine MPC-Verbindung (Multi Point Constraint), die nach der Montage der Mini-TED über ein Unterprogramm aktiviert werden kann (siehe [3]). Um Loslager darstellen zu können, ist es notwendig, in jedem Scharnierknoten der Hinterkante ein lokales Koordinatensystem einzuführen (System 1 in Bild 4), das während der Analyse mitgeführt wird. Die Definition der MPCs in diesen lokalen Koordinatensystemen und deren Aktualisierung erfolgt wiederum

über ein Unterprogramm. Das lokale Koordinatensystem 2 im Lagerknoten der Mini-TED wird nicht zur Modellierung der Scharniere verwendet sondern nur zur Interpretation der Ergebnisse. Bild 5 zeigt die Mini-TED und ihre Scharnierverbindungen zur Hinterkante nach erfolgter Montage und Aktivierung der MPCs. Deutlich erkennbar ist, wie sich der W-Schlag der Landeklappenhinterkante in der Verformung der Mini-TED widerspiegelt.

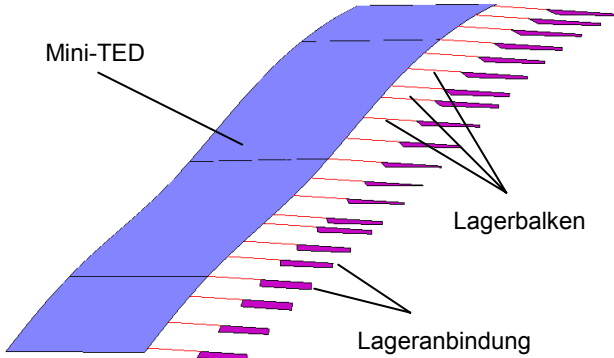


Bild 5: Anbindung Mini-TED

Die Mini-TED selber besteht aus einem mehrschichtigen Laminat, welches vom verwendeten FE-Programm MSC.Marc™ zu jeder Iteration neu ausgewertet wird (siehe [2], [5]). Um die daraus resultierenden sehr langen Rechenzeiten zu reduzieren, wird das Integral über die Schalendicke (generalisierte Spannungs-Dehnungs-Beziehung) vorab einmal aufgestellt. Während der eigentlichen Simulation wird dann die resultierende 11x11 Matrix über ein Unterprogramm auf die Elemente der Mini-TED appliziert. Diese Matrix beinhaltet 3x3 Komponenten für die Membranspannungen und 5x5 Komponenten für die Biegespannungen (siehe [6]). Die übrigen Komponenten sind programmspezifisch und bestehen aus vorab berechneten Werten zur Steigerung der Effizienz sowie einer künstlichen Steifigkeit für den Rotationsfreiheitsgrad senkrecht zur Schalenebene.

2.2 Lasten und Randbedingungen

Neben der Idealisierung der Hinterkante und der Mini-TED besteht eine weitere Herausforderung in der geeigneten Umsetzung der zum Teil sehr komplexen Lasten und Randbedingungen.

Zur Simulation der Montage der Mini-TED werden die Lagerknoten der Mini-TED über ein Anwenderprogramm auf die zugehörigen Knoten der Landeklappenhinterkante projiziert. Um ein Eindringen der Mini-TED in die Hinterkante zu vermeiden, wird darüber hinaus der Kontakt zwischen den beiden Komponenten berücksichtigt. Zur Verbesserung der Geometrieauflösung wird mit der MSC.Marc™ Option für analytischen Kontakt gearbeitet. Hierbei werden die diskreten Flächen der FE-Netze durch analytische Flächen ersetzt, welche die Krümmung der Oberflächen besser abbilden können (siehe [2]). Der Einfluß des W-Schlages auf die Vorkrümmung der Mini-TED ist in Bild 5 dargestellt.

Während des Fluges kommt es aufgrund der aerodynamischen Lasten zu einer parabolischen Verbiegung des

gesamten Flugzeugflügels und damit auch der Landklappenhinterkante. Zur Berücksichtigung dieses Effektes werden die Verschiebungen der Schubmittelpunktslinie in globale z-Richtung aus einer MSC.Nastran™ Rechnung als Randbedingungen aufgebracht. Zur Unterdrückung von Starrkörperbewegungen werden an den Anbindungen der Landklappe an den Flügel (siehe Bild 3) sämtliche Verschiebungen und Rotationen aus der Simulation appliziert.

Das eigentliche Analyseziel ist es, das Verhalten der Mini-TED während des Schwenkens zu untersuchen. Hierzu werden MSC.Marc™ Aktuatorelemente verwendet (siehe Bild 6), deren Länge während der Simulation variiert werden kann. Die Anbindung an die Landklappenhinterkante und die Mini-TED erfolgt so, daß ein Verkürzen der Aktuatoren eine Rotation der Mini-TED um ihre Scharnierlinie bewirkt. Da die Luftlasten auf die Mini-TED einen entscheidenden Einfluß auf das Beulverhalten der Mini-TED haben, werden sie ebenfalls mit in das Modell aufgenommen. Dabei muß berücksichtigt werden, daß sich die Angriffsfläche der Luftlasten durch das Schwenken der Mini-TED ändert. Darüber hinaus besteht eine Ortsabhängigkeit in Profiltiefen- und Spannweitenrichtung. Das Aufbringen und Aktualisieren dieses mehrdimensionalen Druckfeldes erfolgt wiederum über ein Unterprogramm. Bild 6 zeigt die Luftlasten auf die Mini-TED für einen beliebigen Schwenkwinkel.

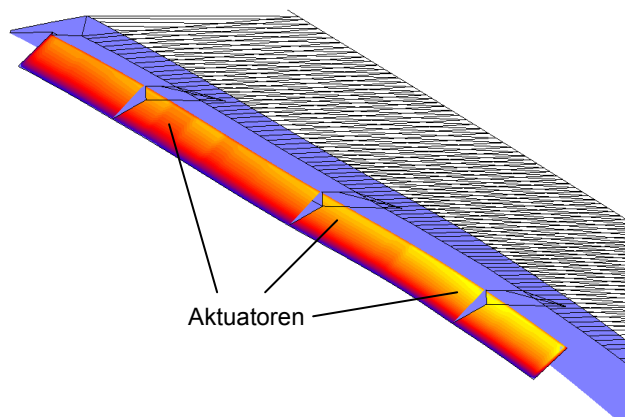


Bild 6: Ortsabhängige Luftlasten

2.3 Analysesteuerung

Zur Durchführung der nichtlinearen Berechnungen wird die gesamte Analyse in mehrere Lastschritte gleicher Länge unterteilt. Die gewählten Zeiten haben dabei keinen Einfluß auf die Physik des Systems, dienen jedoch zur Steuerung der Lasten und Randbedingungen sowie der Anwenderprogramme, da einzelne Module in Abhängigkeit der Zeit aktiviert beziehungsweise deaktiviert werden. Zur Berücksichtigung der geometrischen Nichtlinearitäten werden sämtliche Analysen mit den MSC.Marc™ large displacement, updated Lagrange und follower force Optionen gerechnet (siehe [1], [2] und [7]).

3 Ergebnisse

Das vorgestellte Modell der Mini-TED erlaubt eine umfangreiche Analyse verschiedener Konfigurationen und Flugzustände. Als wichtige Ergebnisse dienen unter ande-

rem das Beulverhalten und die Dehnungen der Mini-TED, die Lasten und Spalte in den Scharnieren sowie die Kräfte in den Aktuatoren. Zur leichten Interpretation werden die Lagerkräfte immer im lokalen Koordinatensystem der Mini-TED und die Lagerspalte im lokalen Koordinatensystem der Hinterkante ausgegeben (siehe Bild 4). Im folgenden werden exemplarisch einige Ergebnisse einer durchgängigen und einer geteilten Mini-TED Konfiguration vorgestellt. Aus Gründen der Geheimhaltung werden dazu alle Ergebnisse auf einen geeigneten Bezugswert skaliert:

- Winkelangaben auf Vollausschlag der Mini-TED
- Auslenkungen auf Profiltiefe der Mini-TED
- Kräfte auf die maximale Luftlast
- Spannweitenposition auf die Länge der inneren Landeklappen

3.1 Modellvalidierung

Zur Validierung des erstellten nichtlinearen Modells werden unter anderem einige lineare Vergleichsrechnungen mit dem in Bild 2 dargestellten MSC.Nastran™ Basismodell und dem in Bild 3 abgebildeten MSC.Marc™ Modell durchgeführt. Um die Ergebnisse vergleichen zu können, wird die Mini-TED aus dem MSC.Marc™ Modell herausgenommen. Bild 7 zeigt exemplarisch die Verformungen der Scharnierlinien in globale z-Richtung, die aus Einheitslasten an den Scharnierpunkten resultieren. Die Schubmittelpunktlinie ist hierzu nur an den in Bild 3 gekennzeichneten Anbindungen an den Flügel fixiert.

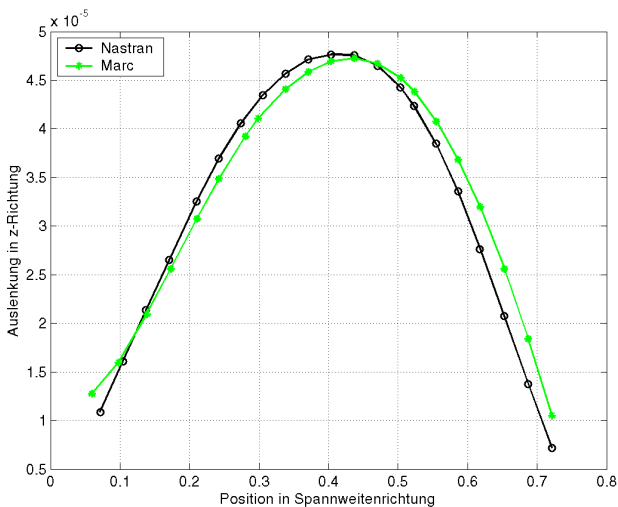


Bild 7: Vergleich der Auslenkungen der Scharnierlinie in globale z-Richtung

Gut zu erkennen ist die qualitative und quantitative Übereinstimmung der beiden Verläufe. Das heißt die Steifigkeit der Landeklappen wird durch die gemachte Idealisierung hinreichend genau wiedergegeben.

3.2 Vergleich unterschiedlicher Mini-TED Varianten

Während zur Modellvalidierung sämtliche Nichtlinearitäten vernachlässigt werden, zeigt Bild 8 die Lagerlasten auf die Hinterkante für die durchgängige Mini-TED unter Berücksichtigung der Montagevorspannung der Mini-TED und sämtlicher geometrischer Nichtlinearitäten am Ende der Simulation. Die Kräfte werden dazu in ihre Komponenten

in der Ebene der Mini-TED (in plane, y-Richtung in Bild 4) und senkrecht dazu (out of plane, z-Richtung) zerlegt.

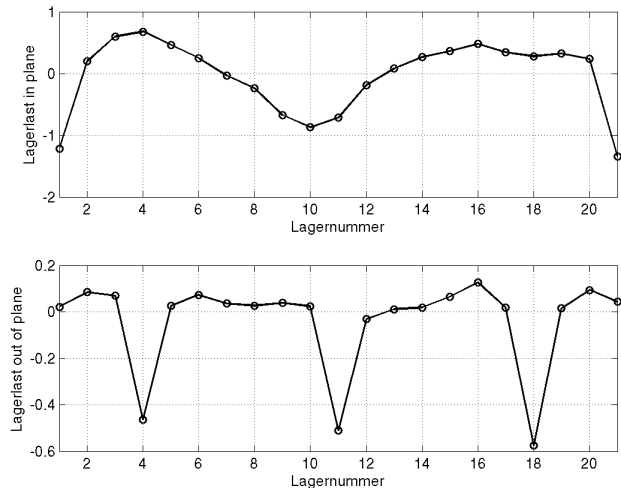


Bild 8: Lagerlasten durchgängige Mini-TED bei Vollausschlag (oben: in plane, unten: out of plane)

Aufgrund des starken W-Schlages der Landeklappenhinterkante in Verbindung mit den hohen Steifigkeiten der Hinterkante und der Mini-TED kommt es zu großen Belastungen in der Ebene der Mini-TED. Gut zu erkennen ist, wie sich der Einfluß des W-Schlages in den in plane Lasten widerspiegelt. Im Gegensatz dazu werden die out of plane Kräfte durch die äußeren Luftlasten auf die Mini-TED dominiert, die an den Aktuatorlagern in die Hinterkante eingeleitet werden (Lager 4, 11 und 18). Bild 9 zeigt die entsprechenden Ergebnisse für die geteilte Konfiguration.

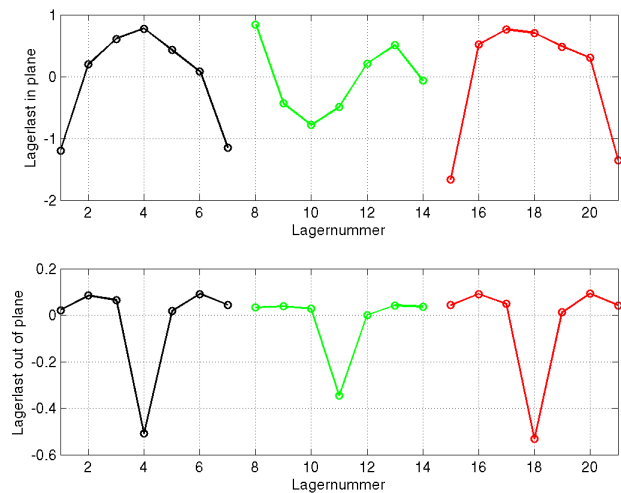


Bild 9: Lagerlasten geteilte Mini-TED bei Vollausschlag (oben: in plane, unten: out of plane)

Während die out of plane Kräfte im Vergleich zu Bild 8 einen ähnlichen Verlauf zeigen, treten bei den in plane Lasten an den Trennstellen der einzelnen Mini-TEDs Unterschiede auf, da sich die Mini-TEDs dort nun frei einstellen können.

Neben den Scharnierkräften spielen die maximalen Ausweichungen der Mini-TEDs eine entscheidende Rolle, da sie eine vorgeschriebene Toleranzabweichung nicht über-

schreiten dürfen. Bild 10 zeigt die Differenz zwischen der maximalen und der minimalen Verdrehung um die globale x-Achse relativ zur Hinterkante über dem Schwenkwinkel. Die Sprünge in den Winkelabweichungen bei sehr kleinen Schwenkwinkeln sind in der Definition des Relativwinkels in den Anwenderprogrammen begründet.

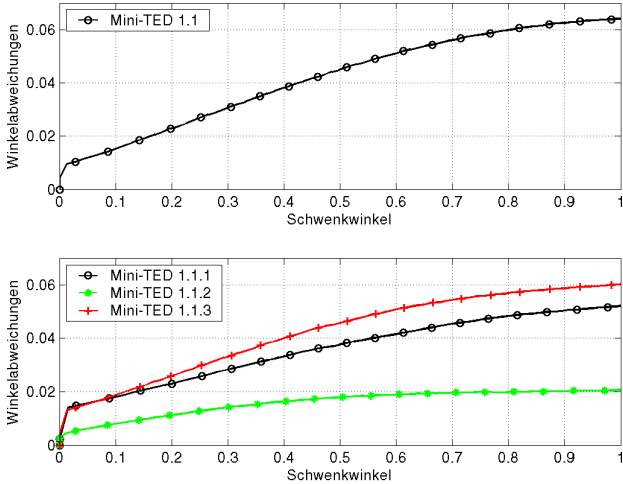


Bild 10: Vergleich der Toleranzabweichungen (oben: durchgängige Mini-TED, unten: geteilte Mini-TED)

3.3 Variation der Lagersteifigkeiten

Wären die größten out of plane Lasten in Bild 8 und 9 an den Aktuatorlagern auftreten, liegen die höchsten in plane Belastungen mitunter in Nicht-Aktuatorlagern. Dies ist ungünstig, da die Aktuatorlager in die Beschläge integriert sind, über die die Aktuatoren an der Mini-TED angebunden werden und deshalb höhere Kräfte ertragen können. Ziel ist es, durch geeignete Variation der Lagersteifigkeiten die Belastungen so zu modifizieren, daß sie überall in einem tolerierbaren Bereich liegen. Das in Bild 4 gezeigte Modell des Lagers ermöglicht eine solche gezielte Anpassung durch Änderung der Querschnittsparameter des Lagerbalkens. Bild 11 zeigt die in plane Lasten der durchgängigen Mini-TED für drei unterschiedliche Lagersteifigkeiten, wobei Variante 1 die steifste und Variante 3 die nachgiebigste Lagerung darstellt.

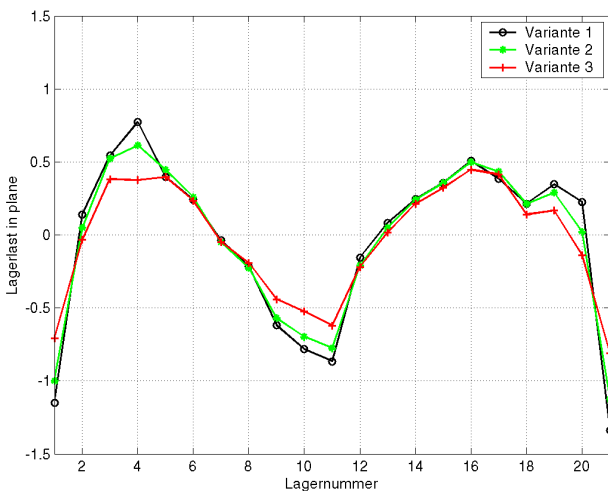


Bild 11: In plane Lasten

Gut zu erkennen ist, daß sich durch die Variation des Lagerquerschnitts die Belastungen in den Bereichen um die Rand- und die Aktuatorlager absenken lassen. Allerdings gibt es auch einige Lager, wie zum Beispiel das Lager 16, die sich durch diese Maßnahme fast gar nicht beeinflussen lassen. Darüber hinaus besteht aufgrund der Nichtlinearitäten im System für keine der analysierten Varianten eine lineare Abhängigkeit zwischen Lagersteifigkeit und Lagerlast.

Da die erzielten Verbesserungen mit einer Änderung des Lagerspiels einhergehen, sind in Bild 12 und 13 das Axialspiel und der out of plane Spalt für die drei untersuchten Varianten dargestellt. Die Ergebnisse werden hierbei in den lokalen Koordinatensystemen der Landklappenhinterkante angegeben (siehe Bild 4).

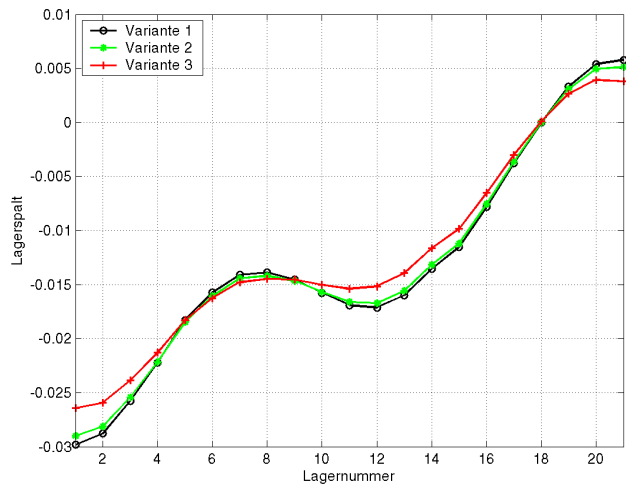


Bild 12: Axialspiel bei Vollausschlag

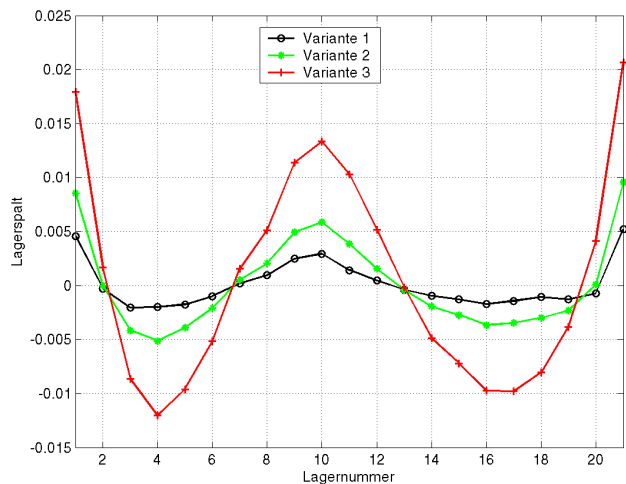


Bild 13: Out of plane Spiel bei Vollausschlag

Während sich für das Axialspiel eine geringfügige Verbesserung ergibt, steigt das out of plane Spiel aufgrund der zunehmenden Nachgiebigkeit der Lagerbalken merklich an. Wiederum spiegelt sich der W-Schlag der Landklappenhinterkante in den Kurvenverläufen wider.

Bei den bisher vorgenommenen Variationen wurden alle Lager gleich behandelt, das heißt es wurde nicht zwischen Aktuatorcharnier und Nicht-Aktuatorcharnier unterschied-

den. Da erstere konstruktionsbedingt jedoch höhere Kräfte ertragen können, ist in Bild 14 das Ergebnis einer Rechnung mit steiferen Aktuatorlagern im Vergleich zu Variante 3 aus Bild 11 abgebildet.

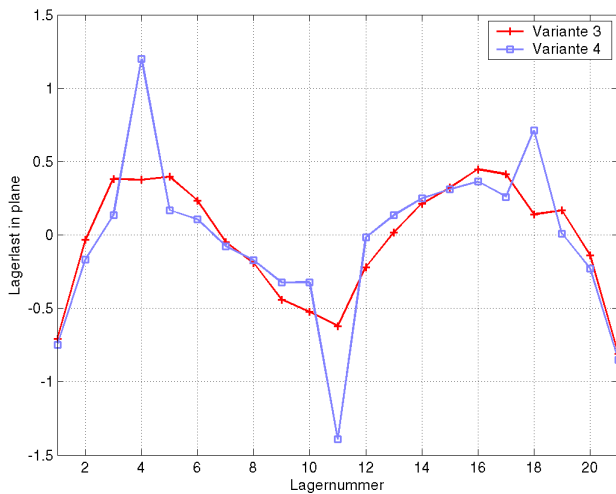


Bild 14: In plane Lasten

Erwartungsgemäß steigen die Kräfte in den steiferen Lagern deutlich an, was jedoch gleichzeitig zu einer Absenkung der Belastungen in den benachbarten Scharnieren führt. Bemerkenswert ist vor allen Dingen, daß durch diese Maßnahme in den Lagern, die in Bild 11 nicht beeinflusst werden konnten, ebenfalls eine Reduktion erzielt werden kann.

Da sich die Änderung des Kraftverlaufs wiederum im Lagerspiel widerspiegelt, ist in Bild 15 das zugehörige out of plane Spiel für die entsprechenden Scharniervarianten abgebildet. Auf eine explizite Darstellung des Axialspiels wird verzichtet, da der Einfluß der steiferen Aktuatorlager auf dieses Ergebnis gering ist.

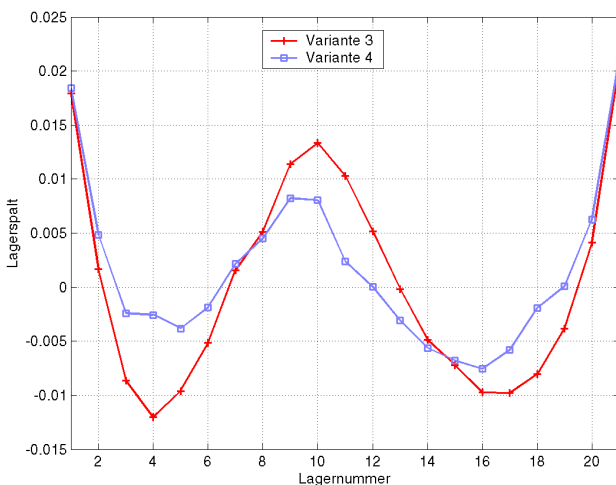


Bild 15: Out of plane Spiel bei Vollausschlag

4 Zusammenfassung

Mini-TEDs sind eine von mehreren neuen Technologien, die im Projekt AWIATOR entwickelt werden, um unter anderem das Auftriebsverhalten von Flugzeugen zu verbessern und die Geräuschentwicklung zu reduzieren.

Dazu werden zusätzliche Klappen in die Ladeklappen integriert und je nach Flugzustand um bis zu 90° ange stellt.

Für die Auslegung dieser neuartigen Komponenten wird ein FE-Modell zur Durchführung nichtlinear statischer Berechnungen an der inneren Landeklappe eines Airbus A340 vorgestellt. Auf Basis eines sehr detaillierten MSC.Nastran™ Modells wird ein abstraktes FE-Modell abgeleitet, bei dem nur die Hinterkante voll ausmodelliert ist. Der Steifigkeitseinfluß der restlichen Landeklappe wird durch einen Ersatzbalken in der Schubmittelpunktslinie mit variabler Steifigkeit in Spannweitenrichtung idealisiert. Dieses vereinfachte Modell garantiert einerseits vertretbare Rechenzeiten zur Durchführung von Parameterstudien und ermöglicht andererseits die Berücksichtigung aller relevanten nichtlinearen Effekte. Als Lasten und Randbedingungen werden der Kontakt zwischen der Mini-TED und der Hinterkante der Landeklappe sowie die veränderlichen Luftlasten berücksichtigt. Um die Analyse effizient zu gestalten, wird ein Teil der Prozesse über eigene Unterprogramme gesteuert.

Anhand einiger ausgewählter Beispiele werden die Analysemöglichkeiten des nichtlinearen Modells vorgestellt. Wichtige Ergebnisse sind hierbei die maximalen Auswehungen, die Dehnungen innerhalb des Laminats sowie die maximalen Lagerlasten und -spalte in den Scharnieren zwischen der Mini-TED und der Hinterkante. In einer kurzen Parameterstudie wird der Einfluß der Lagersteifigkeiten auf die Lagerlasten aufgezeigt und Möglichkeiten zur Reduzierung der maximalen Lasten diskutiert.

Im Jahr 2005 werden die hier vorgestellten Mini-TEDs zusammen mit anderen neuartigen Komponenten in einem Flugexperiment an einem Airbus A340 unter Praxisbedingungen getestet. Im Vordergrund stehen dabei weniger die mechanischen Eigenschaften der Mini-TEDs sondern ihr Einfluß auf die Aerodynamik des Flugzeugs.

5 Literatur

- [1] Cook, R., Malkus, D, and Plesha, M.: Concepts and Applications of Finite Element Analysis; John Wiley & Sons Inc, third edition, 1989
- [2] MSC.Marc™ Volume A: Theory and User Information, Version 2001
- [3] MSC.Marc™ Volume D: User Subroutines and Special Routines, Version 2001
- [4] MSC.Nastran™: Quick Reference Guide, Version 2001
- [5] MSC.Nastran™: Reference Manual, Version 2001
- [6] Link, M.: Finite Elemente in der Statik und Dynamik, 3. Auflage; B. G. Teubner GmbH, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden, 2002
- [7] Zienkiewicz, O. C. and Taylor R. L.: The Finite Element Method; Fourth Edition; Volume 2: Solid and Fluid Mechanics, Dynamics and Non-Linearity; McGraw-Hill Book Company, 1991