

Untersuchung einer größeren Variantenvielfalt in Konzeptphasen mit Hilfe eines feature-basierten Geometriemodells am Beispiel von Verdichterrotoren.

Carsten Subel, MTU Aero Engines GmbH

1 Zusammenfassung

Zur Unterstützung des Konstruktionsprozesses im Concurrent Engineering wurde ein feature-basiertes Geometriemodell entwickelt, das eine automatisierte, multidisziplinäre Finite-Element-Analyse ermöglicht. Die Methodik basiert auf der Kombination von Features mit Hilfe im Solid-Modeling üblicher Boolescher Operationen. Ein Feature ist ein Geometrieobjekt, hier Flächen, dem Eigenschaften, Randbedingungen, Restriktionen, Regeln und Wissen im Allgemeinen zugewiesen werden. Zur Automatisierung der Analyse und besonders des FE-Preprocessing wurde das Solid-Modeling erweitert. Bei jeder Booleschen Operation werden Dekompositionskurven hinzugefügt, die eine spätere Unterteilung der kompletten Geometrie in vernetzbare Flächen definieren. Beim Assembly von Features werden alle nötigen Abhängigkeiten und Verbindungen zwischen diesen Bauteilen erzeugt. Die feature-basierte Geometriemodellierung ermöglicht die schnelle Generierung von Varianten durch das Hinzufügen oder Austauschen von Features. Gleichzeitig wurde durch die Erweiterungen des Solid-Modeling und durch das zugeordnete Wissen die FE-Analyse automatisiert. Diese Methodik wird auf die Untersuchung von Verdichterrotoren in der Konzeptphase angewendet.

2 Einleitung

Die Auslegung von Flugtriebwerke und deren Verdichter- und Turbinenkomponenten ist eine komplexe und multidisziplinäre Vorgehensweise und befindet sich im Wandel. Frühere Auslegungen waren in starkem Maße durch die hohen technischen Anforderungen getrieben, was gleichzeitig zu hohen Kosten führte. Heutige Produkte müssen in kürzeren Entwicklungszyklen das hohe technische Niveau und die hohe Qualität halten bzw. ausbauen und dabei die wirtschaftlichen Anforderungen einhalten. Der Wandel bezüglich der Entwicklung in der heutigen Luftfahrtindustrie ist in mehreren Veröffentlichungen beschrieben, siehe [1], [2]. Die Anforderungen an Flugtriebwerke beziehen sich nicht mehr allein auf das beste Triebwerk mit höchster Leistung oder höchstem Schub, sondern auf wirtschaftliche Triebwerke mit hoher Leistung und geringen Direct Operating Cost. Hierzu gehören unter anderem ein geringer Brennstoffverbrauch, geringe Schallemissionen und niedrige Wartungskosten.

Kau beschreibt den Wandel des zukünftigen Konstruktionsprozesses, in [3], und gibt auch einen ausführlichen Überblick über die Komplexität der Auslegung von Verdichtern und deren multidisziplinären Charakter. Die Merkmale des zukünftigen Prozesses sind ein Vorgehen mit hohem Grad an parallelen Aktivitäten, eine hohe Integration und Interaktion von mehreren Fachdisziplinen, eine große Verantwortung jedes beteiligten Experten und die gleichzeitige Unterstützung durch numerische Verfahren mit einer einzigen Datenbasis, die vollständige, konsistente Daten für alle Fachdisziplinen bereitstellt.

Hsu und Woon weisen, in [4], auf eine komplette Betrachtung bezüglich Funktion, Verhalten und physikalischer Struktur von Produkten hin, um bereits in der Konzeptphase eine ganzheitliche Bewertung zu ermöglichen. Die Detaillierung eines Entwurfes kann nur so gut sein, wie das ausgewählte

Konzept, es wird dieses Konzept jedoch nicht verbessern können. Änderungen, die somit in den späteren Phasen des Auslegungsprozesses vorgenommen werden müssen, weil durch gewonnene Erkenntnisse eine Auslegung anders bewertet werden muss, führen in Folge eines Redesigns zu erhöhten Kosten und längeren Entwicklungszeiten, Abb. 1. Wood ergänzt diesen Ansatz, in [5], durch eine nötige Integration von vorhandenen Erfahrungen und sieht den heutigen Designprozess

weiterhin als einen kreativen und intuitiven Vorgang, der nicht allein durch die numerischen Verfahren bestimmt sein sollte. Einen ähnlichen Ansatz verfolgt das Concurrent Engineering. Erfahrungen aus vorangegangenen Auslegungen fließen so früh wie möglich in neue Auslegungen ein. Die Qualität und Wirtschaftlichkeit wird durch die frühe Integration von bestehendem Wissen und die frühe Beteiligung aller Fachdisziplinen verbessert, siehe hierzu auch [6].

Zur numerischen Unterstützung des Konstruktionsprozesses sind in vielen Fachgebieten umfangreiche Untersuchungen gemacht worden, die hier nur ausgewählt erwähnt werden sollen. Zum Beispiel Untersuchungen zur Datenverwaltung, das sogenannte Master-Model-Konzept zur Bereitstellung einer konsistenten Datenbasis [7], Lösungen komplexer, multidisziplinärer Aufgaben mit Hilfe numerischer Optimierungsverfahren [8], Prozessverwaltung mit Hilfe von sogenannten Frameworks [9], Methoden zur Geometrieerstellung und Bauteilmodellierung [10], [11], [12]. Die multidisziplinäre Analyse und Optimierung

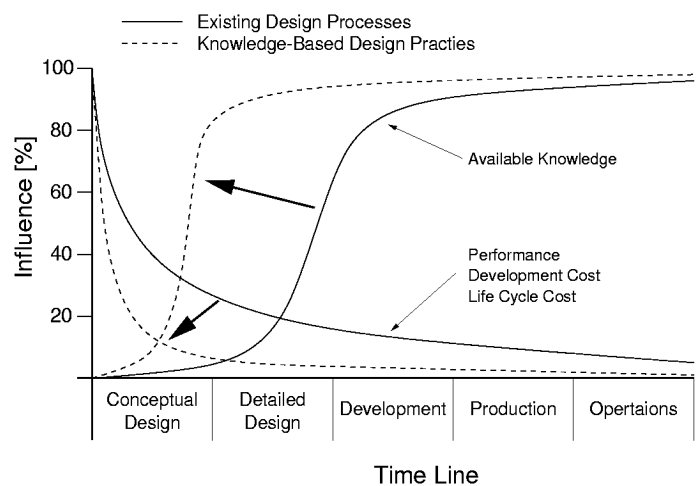


Abbildung 1: Auswirkungen durch die frühe Integration von Erfahrungen auf den Konstruktionsprozess, Kosten und Qualität. [5]

wird hierbei als effektive Methoden angesehen, um das technische Niveau heutiger Produkte weiter zu verbessern.

Die zukünftigen, numerischen Verfahren sollen den Entwicklungsingenieuren und Konstrukteuren eine hohe kreative Freiheit bei gleichzeitiger Unterstützung durch Erfahrungen und durch vorhandenes Wissen bieten. Sie sollten in kurzer Zeit hochwertige Finite-Element-Analysen und numerische Optimierungen ermöglichen, ohne dabei den Ingenieur mit sich wiederholenden Standardaufgaben zu belasten. Es müssen mehrere Varianten schnell untersucht werden, um bereits in der Konzeptphase eine hochwertige Aussage über die Machbarkeit treffen zu können. In den folgenden Abschnitten wird eine Methode vorgestellt, die durch die Anwendung der feature-basierten Modellierung in der Konzeptphase die Anzahl der Varianten und deren Untersuchungen erhöht und beschleunigt. Die Methodik wird auf die Auslegung von Verdichtertrotoren angewendet.

3 Geometriemodell

Zur Beschleunigung der Auslegung in der Konzeptphase wurde ein feature-basiertes Geometriemodell entwickelt. Es basiert auf den gängigen, parametrischen Verfahren des Computer Aided Designs und verwendet einen objekt-orientierten Ansatz. Der Definition von Brunetti und Golob, in [11], folgend, wird ein Feature in diesem Zusammenhang als ein Bauteil oder Objekt angesehen, welches aus der definierenden Geometrie und zugehörigen Eigenschaften besteht.

Die Modellierung erfolgt mit Hilfe der im CAD üblichen Operationen, wie zum Beispiel United-Solid, Subtracted-Solid oder Assemblies. Eine Featurestruktur für einen Verdichtertrotor ist in Abbildung 2 gezeigt.

Die Geometriemodellierung innerhalb der Features erfolgt mit Primitivobjekten. Diese geometrischen Primitivobjekte können sowohl Flächen als auch dreidimensionale Körper sein. In der Konzeptphase wird der Rotorentwurf hauptsächlich aus zweidimensionalen Ausgangsgeometrien erstellt. Für dreidimensionale Entwürfe wird diese Geometrie rotiert, extrudiert und mit Hilfe Boolescher Operationen kombiniert. Die feature-basierte Modellierung erfolgt daher mit zweidimensionalen Objekten. Das Ziel ist eine hohe Formvielfalt bei möglichst geringer Anzahl von Parametern. Je nach geforderter Formvielfalt wird die Kontur dieser Objekte über Geraden, Radien oder Freiformelementen gestaltet. Zusätzlich kann die Kontur mit Hilfe von geo-

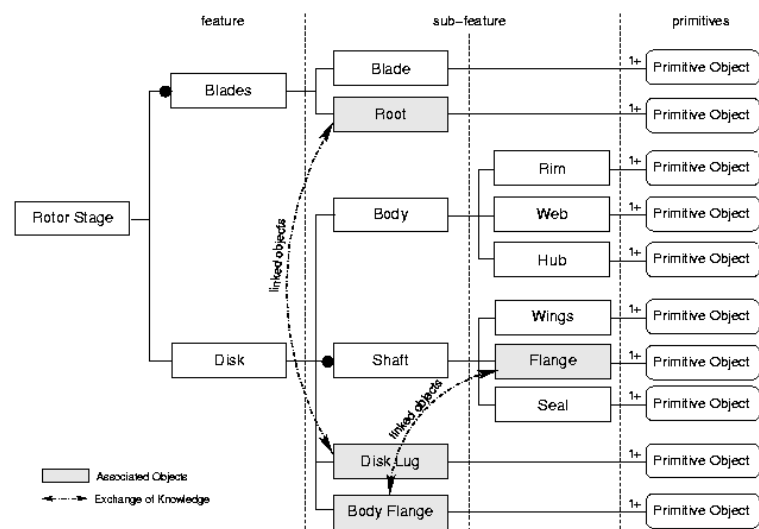


Abbildung 2: Featurestruktur eines Verdichtertrotors.

metrischen Operationen gestaltet. Zusätzlich kann die Kontur mit Hilfe von geo-

metrischen Randbedingungen und Abhängigkeiten definiert oder eingeschränkt werden. In Bezug auf die spätere Finite-Element-Analyse und der hierzu nötigen Vernetzung der Geometrie, werden als Primitivobjekte nur Formen verwendet, die mit guter Qualität zu vernetzen sind.

Der Vorteil der Modellierung mit Features liegt in der Einteilung in handhabbare Geometrieobjekte und der möglichen Zuordnung von Randbedingungen, Abhängigkeiten und Eigenschaften. Auf jeder Ebene der Modellierung kann den Objekten jede Art von Information zugeordnet werden bzw. generiert werden. Bauteilspezifische Eigenschaften können in den Features fest implementiert werden. Hierzu gehören zum Beispiel geometrische Abhängigkeiten zwischen Bauteilen, geometrische Restriktionen und Definitionen und geometrische Bereiche, denen Eigenschaften und Randbedingungen für die spätere Analyse zugewiesen werden müssen. Parameterwerte sind in einer übergeordneten Datenbasis abgelegt.

Die zugeordneten Eigenschaften bauen auf der definierenden Geometrie auf und werden in Form zusätzlicher Objekte in den Features integriert. Solche Eigenschaftsobjekte können entsprechend der Fachdisziplinen gegliedert werden, um spätere Sichten auf das Gesamtmodell und eine Datenübergabe an Finite-Element-Verfahren zu vereinfachen. Die Eigenschaftsobjekte können in jeder Featureebene, der in Abbildung 2 gezeigten Struktur, zugeordnet werden.

Zu Beginn der Auslegung, wenn nur geringe Informationen vorhanden sind, wird die Geometrie auf einem groben und detailarmen Level modelliert, analysiert und bewertet. Im fortschreitenden Konstruktionsprozess wird die Geometrie detailreicher und die Genauigkeit der Inputs, der Randbedingungen und die vorhandenen Informationen größer. Entsprechend werden die Modelle mit Verfahren höherer Genauigkeit analysiert. Dieser Evolution der Geometrie folgt dieses Modell und erlaubt durch das zugewiesene Wissen auf jedem Detaillevel die automatisierte Analyse. Änderungen in des Detaillevels der Geometrie erfolgen durch Hinzufügen von neuen Features oder durch Austausch mit detailreicheren Features.

Um im weiteren Verlauf der Auslegung eine automatisierte Analyse zu ermöglichen, wurde das Solid-Modeling erweitert. Bei jedem Solid-Modeling werden Ausrundungsradien an den Stellen der neu entstandenen Eckpunkte oder Kanten erzeugt. Die Positionierung dieser Radien hängt dadurch nicht von einer CAD-System internen Kennzeichnung ab, sondern von der Überschneidung der zu vereinigenden Bauteile. Diese Art der Positionierung führt zu einer robusteren Modellierung mit Ausrundungsradien und sichert die einwandfreie Modellierung bei jeder möglichen Parameterwahl. Zusätzlich werden mit jedem Solid-Modeling Randbedingungen generiert, die im späteren Verlauf der FE-Analyse benötigt werden. Diese werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

4 Automatisiertes FE-Preprocessing

Die Vorbereitung der Finite-Element-Analyse, das sogenannte FE-Preprocessing, ist in der heutigen Auslegung weiterhin eine zeitintensive Aufgabe. Es gibt verschiedene Ansätze diesen Teilaufgaben zu beschleunigen. Die automatische Netzgenerierung mit Tetraeder-Elementen oder die adaptive Netzgenerierung sind Beispiele hierfür. Es kann jedoch nicht immer von einer einwandfreien, vernetzbaren Geometrie ausgegangen werden, so dass Nachbearbeitungen durch Schließen von Lücken oder Bereinigen der Geometrie nötig sein können. Die Geometrie muss in vernetzbare Bereiche unterteilt werden, so dass die geforderte Elementqualität eingehalten wird und die Elemente nicht verzerrt sind. Weiterhin müssen Randbedingungen oder Eigenschaften des Modells, wie zum Beispiel geometrische Elementeigenschaften, Kräfte, Drücke oder Wärmeübergangskorrelationen, nach der Netzgenerierung zugewiesen werden. Zusätzlich entsteht durch die Trennung von konstruktiven und analytischen Aufgaben und der Bearbeitung dieser Aufgaben von unterschiedlichen Personen eine weitere Informationsschnittstelle. Diese Aufgaben sind im feature-basierten Geometriemodell zusammengefasst. Durch die den Features zugewiesenen Eigenschaften wird die Informationsschnittstelle geschlossen und eine automatische Finite-Element-Analyse ermöglicht.

Samareh beschäftigt sich in mehreren Veröffentlichungen, [13] und [14], mit den Anforderungen, die ein Geometriemodell erfüllen sollte, um es im Bereich der automatisierten Analyse und numerischen Optimierung einzusetzen. Er weißt in diesem Zusammenhang auf eine nötige, enge Verbindung zwischen der Geometriegenerierung und der Vernetzung für die Finite-Element-Analyse hin. Die FE-Modelle sollte sowohl für einfache, überschlägige als auch für sehr genaue, hochwertige Analyseverfahren verwendbar sein. Bei der Erstellung des Geometriemodells wurden die von Samareh angesprochenen Anforderungen berücksichtigt.

Die Wahl des Elementtyps kann die qualitative Aussage der Analyseergebnisse beeinflussen. Wird eine Verwendung von Viereckselementen vorgeschrieben, bedarf es der Aufbereitung der Geometrie zur Vernetzung und der Einteilung oder Dekomposition in vernetzbare Flächen. Diese Aufbereitung der Geometrie wurde als Wissen ins Solid-Modeling integriert. Bei jeder Booleschen Geometrieoperation, zum Beispiel das Vereinigen oder

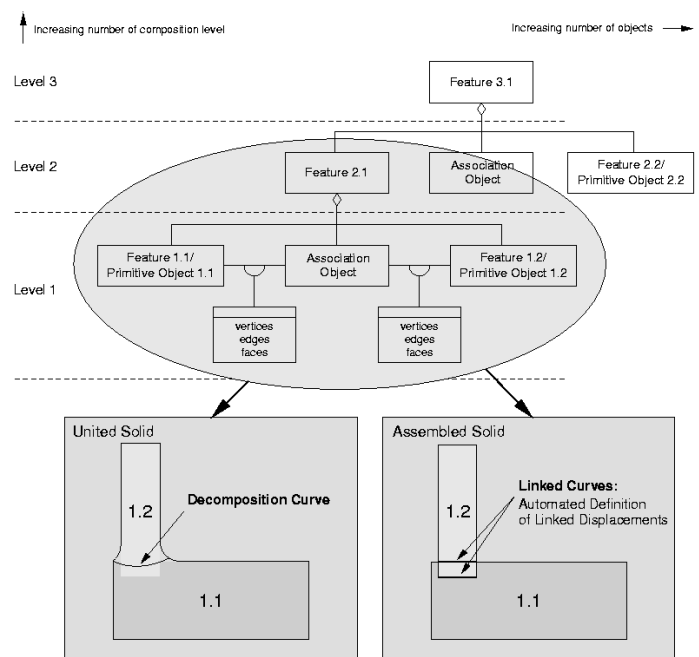


Abbildung 3: Erweiterung des Solid-Modeling durch automatisches Hinzufügen von FE-Randbedingungen.

Subtrahieren von Objekten, werden Dekompositionselemente hinzugefügt und wissensbasiert positioniert. Hierdurch kann die, aus den Features, aufgebaute Geometrie vor der Analyse automatisch in vernetzbare Flächen unterteilt werden. Durch die Verwendung von vernetzbaren Primitivobjekten während der Geometriemodellierung kann eine automatische Vernetzung mit Viereckselementen bei guter Netzqualität sichergestellt werden.

Im Fall des Zusammenbaus oder Assembly müssen den Bauteilen in der Finite-Element-Analyse Verbindungen zugewiesen werden. Diese Verbindungen werden häufig auch Links oder Linked Displacements genannt. Die Zuordnung dieser Links erfolgt wissensbasiert. Die korrespondierenden Knoten werden erkannt und die nötigen Verbindungen beim Solid-Modeling automatisch zugeordnet.

Nach der Vernetzung der Geometrie müssen die Eigenschaften eines Bauteils auf das Netz übertragen werden. Der hier verfolgte Ansatz beruht darauf, dass die Positionierung und Dimensionierung der Features, abgesehen von geometrischen Restriktionen, beliebig ist und die FE-Modellierung der Geometriemodellierung folgt. Änderungen in der Art und Anzahl der Konturkurven haben keinen Einfluss auf das FE-Modell. Das FE-Modell wird komplett aus den Features abgeleitet. Die Eigenschaften und Randbedingungen können einem Geometrieobjekt direkt zugeordnet werden, als Beispiel sei hier die Punktlast im Schaufelschwerpunkt genannt. Variable Bereiche denen Randbedingungen zugewiesen werden müssen, werden über charakteristische Merkmale wissensbasiert erkannt. Beispiele hierfür sind Bereiche, denen eine bestimmte Wärmeübergangskorrelation zugeordnet wird.

Durch die Erweiterung des Solid-Modeling und der Modellierung mit Features besitzt das Geometriemodell die vollständigen Informationen über seine Eigenschaften, Verhalten und Randbedingungen. Aus diesem kompletten Produktmodell werden durch Sichten auf das Modell die Informationen gefiltert, aufbereitet und an die Analyse weitergegeben. Hierdurch wird die komplett automatisierte Finite-Element-Analyse ermöglicht und ist damit unabhängig von der Variantengestaltung. Da jedem Feature Eigenschaften zugeordnet wurden, können diese ausgetauscht und die Featurestruktur erweitert werden, ohne das FE-Preprocessing und die Analyse zu beeinträchtigen.

5 Auslegungsprozess und Entwurfsvarianten

Der Konstruktionsprozess als ein kreativer Lösungsfindungsprozess ändert sich durch die feature-basierte Modellierung nicht. Die Teilaufgaben, beginnend bei der Ausarbeitung mehrerer Lösungsvarianten bis zu deren Bewertung, werden jedoch erheblich beschleunigt. Betrachtet man die Vorgehensweise zur Erstellung von Rotorentwürfen, stellt man fest, dass gleiche Funktionen erfüllt werden müssen und es hierfür unterschiedliche Entwürfe gibt. Beispiele hierfür sind die Verbindung zwischen Schaufel und Rotorscheibe, die Verbindung zwischen einzelnen Rotorscheiben und die Verhinderung von Rückströmungen zwischen Rotor und Stator, Tabelle 1. Zusätzlich wird der Rotorentwurf in starkem Maße durch Inputs, wie die Ringraumgeometrie, die Rotor-, Statorschaufeln und die an-

grenzenden Lageranbindungen, definiert. Diese Inputs und besonders der Ringraumentwurf werden während der Konzeptphase variieren und können großen Einfluss auf die Machbarkeit und Einhaltung der Anforderungen haben, wie Gewicht und Lebensdauer der Rotorscheiben.

Funktion	Entwürfe		
Schaufel und Scheibe verbinden	Axiale Schaufelfüße	Umfangsfüße	integral gefertigt
Scheiben verbinden	Verschweißte Flansche	Verschraubte Flansche	Verschraubte Flansche mit durchbohrter Scheibe
Rückströmung verhindern	Labyrinthdichtung	einzelne Dichtspitzen	Einzelne Dichtspitzen auf separatem Arm

Tabelle 1: Beispiele für typische Funktion und mögliche Entwürfe in der Rotorkonstruktion.

Jeder Entwurf kann mit Hilfe des feature-basierten Geometriemodells sofort analysiert werden. Dieses gilt für Variation innerhalb der Featurestruktur, Änderung der Detaillevel, Variation der Inputs und Änderungen der Parameterwerte. Für die Erstellung des ersten Rotormodells werden Startwerte verwendet, die auf Erfahrungen, Regeln oder Abhängigkeiten zwischen Bauteilen beruhen. Ein Beispiel für die Änderung des Rotorentwurfs ist in Abbildung 4 gezeigt. Der Entwurf mit integral gefertigten Rotorscheibeln weist ein niedriges Gewicht, eine niedrigere Belastung durch geringe Randlasten und eine höhere Lebensdauer der Rotorscheiben auf. Ist die Lebensdauer nicht kritisch und die Gewichtsanforderung unterschritten, kann zur Kostenreduzierung ein Entwurf mit axialer Schaufel-Scheibe Verbindung verwendet werden. Der neue Entwurf wird durch Parameteränderungen erzeugt, dieses gilt sowohl für das Hinzufügen der neuen Features als auch für die Anpassung von Dimensionierungsparametern. Da alle nötigen Eigenschaften in den Features abgelegt sind, kann die FE-Analyse nach der Veränderung des Entwurfes automatisch ausgeführt werden, Abbildung 5.

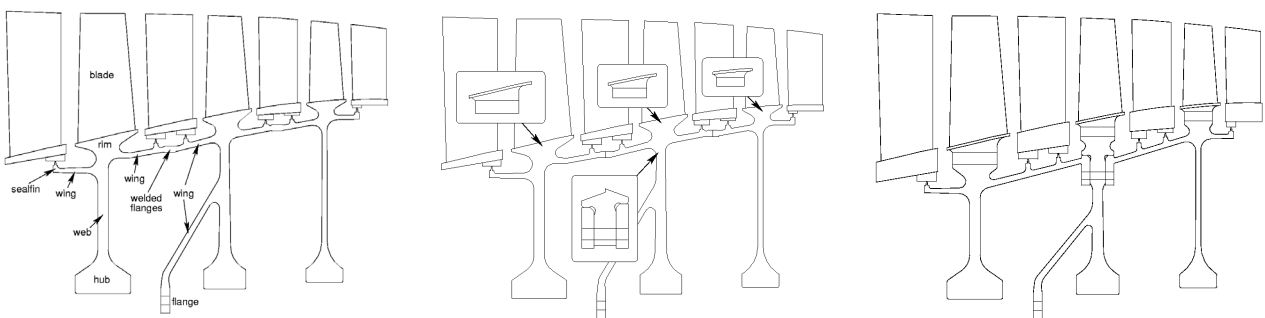


Abbildung 4: Beispiel für die Verwendung des feature-basierten Geometriemodells und Änderung eines Rotorentwurfs durch Variation der Schaufel-Scheibe Verbindungen und Änderung der Rotorscheibenverbindung.

Kriterien zur Bewertung der Rotorentwürfe sind Gewicht, Lebensdauer, Berstfaktor, maximale Spannung und maximale Temperatur. Das Gewicht wird mit Hilfe der CAD internen Analyse bestimmt. Zur Bewertung der Spannungen und Temperaturen werden Finite-

Element-Analysen durchgeführt, die auf den MTU internen Prozessen beruhen. Es sind hierfür keine Anpassungen innerhalb der Analyseverfahren notwendig.

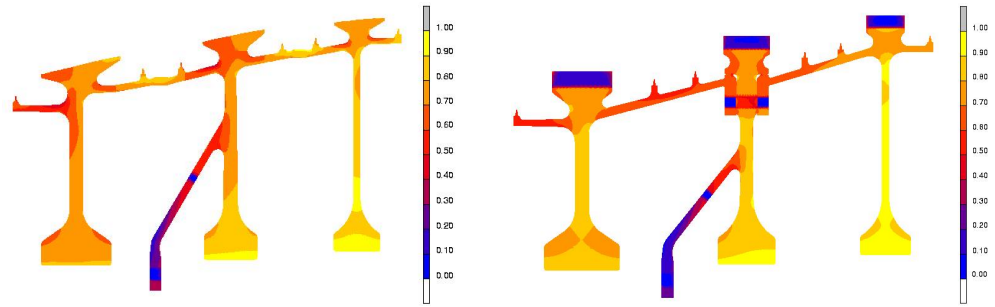


Abbildung 5: Beispiel für die automatisierte Finite-Element-Analyse mit Hilfe des feature-basierten Geometriemodells. Gezeigt sind die normierten Ergebnisse der Festigkeitsanalyse, Max Principal Stress.

Eine schematische Darstellung der bisherigen, rechnerunterstützten Vorgehensweise in der mehrere Ingenieure an der Konstruktion, Analyse und Bewertung beteiligt sind, zeigt Abbildung 6a. Informationen und Eigenschaften, die während der Konstruktion erarbeitet oder definiert wurden, müssen während der Analyse von unterschiedlichen Berechnungsingenieuren erfragt und nachträglich zugewiesen werden. Bei der feature-basierten Modellierung sind diese Informationen und Eigenschaften bereits zu Beginn der Konstruktion vorhanden und implementiert, Abbildung 6b. Die Vorarbeit liegt in der Definition der Features. Diese werden in Kooperation von Konstrukteur und Berechnungsingenieur erarbeitet. Vergleiche der bisherigen Modellierung mit einer feature-basierten Modellierung und automatisierter FE-Analyse haben gezeigt, dass der Auslegungsprozess nur noch 10% der ursprünglichen Zeitdauer benötigen würde, hierin ist die Vorarbeit für die Featuredefinition nicht berücksichtigt. Änderungen der Entwürfe erfolgen komplett parametrisch. Das erweiterte Solid-Modeling und die Vorgehensweise beim FE-Preprocessing sind im feature-basierten Modell implementiert und automatisiert. Durch diese Automatisierung des Prozesses könnte, zur Erweiterung dieser Methodik, zusätzlich eine numerische Optimierung implementiert werden.

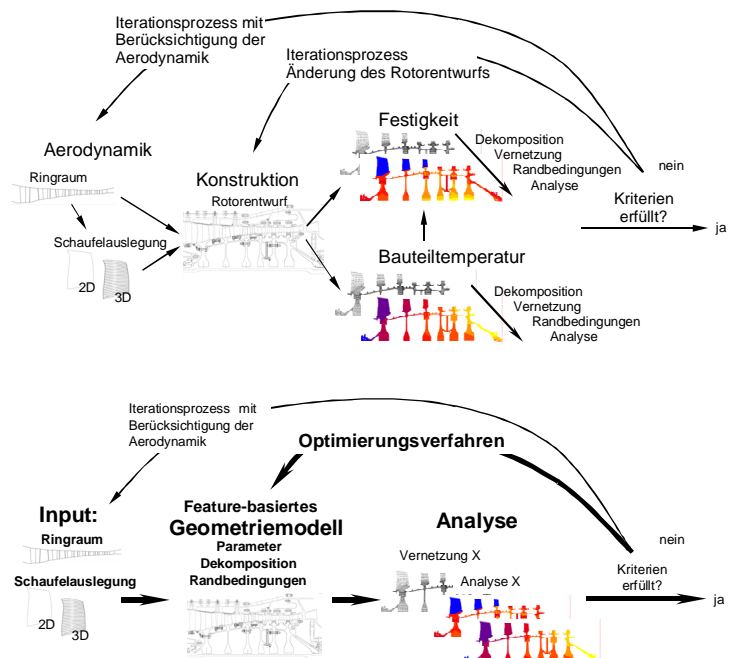


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Auslegungsprozesses mit bisheriger und mit feature-basierter Modellierung.

6 Ergebnis und Ausblick

Die Verwendung des feature-basierten Geometriemodells kann die Auslegung erheblich beschleunigen. Durch die schnelle Variation von Entwürfen und die automatisierte Analyse können in kurzer Zeit unterschiedlichste Varianten analysiert und bewertet werden. Vorteilhaft erweist sich hierbei die Erweiterung des Solid-Modeling und das automatisierte FE-Preprocessing durch die Implementierung der Bauteileigenschaften in den Features.

Weitere Untersuchungen bezüglich der schnellen Variantengenerierung werden durchgeführt. Hierzu sollen zusätzliche Feature definiert und implementiert werden. Besonders die schnelle Variantenuntersuchung bezüglich der Schaufelverbindung zur Rotorscheibe soll erweitert werden. Die Einbindung von numerischen Optimierungsverfahren ist bereits abgeschlossen und soll nun bezüglich einer einfacheren Handhabung verbessert werden.

7 Referenzen

- [1] Raj, P.: Aircraft Design in the 21st Century: Implications for Design Methods; 29th AIAA Fluid Dynamics Conference, June 15-18, 1998, Albuquerque, NM
- [2] LeBoeuf Francis: Integrated Design of High Pressure Multistage Engine Systems – An Overview; RTO AVT Lecture Series: Integrated Multidisciplinary Design of High Pressure Multistage Compressor Systems, September 1998, I-1 – I-5
- [3] Kau, H.-P.: The Multidisciplinary Design Process; RTO AVT Lecture Series: Integrated Multidisciplinary Design of High Pressure Multistage Compressor Systems, September 1998, 1-1 – 1-16
- [4] Hsu, Wynne and Woon, Irene M. Y.: Current Research in the Conceptual Design of Mechanical; Computer-Aided, Vol., No, 377-389
- [5] Wood, Richard M. and Bauer, Steven X. S.: A Discussion of Knowledge Based Design; 7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization - A Collection of Technical Papers, September 1998, Paper 98-4944
- [6] Vajna, Sándor: Approaches of Knowledge-based Design; 19th CAD-FEM Users' Meeting, 2001
- [7] Hoffmann, Christoph M. and Joan-Arinyo, Robert: CAD and the Product Master; Computer-Aided Design, 1998, Vol. 30, No.11, 905-918
- [8] Eli Livne: Multidisciplinary Design Optimization of Aerospace Systems – Special Issue; Journal of Aircraft, 1999, Vol. 36, No. 1
- [9] Acton, David E. and Olds, Dr. John R.: Computational Frameworks for Collaborative Multidisciplinary Design of Complex Systems; 7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization - A Collection of Technical Papers, September 1998, Paper 98-4942

-
- [10] Liang, Wen-Yau and O'Grady, Peter: Design with Objects - An Approach to object-oriented Design; Computer-Aided Design, 1998, Vol. 30, No.12, 943-956
- [11] Brunetti, G. and Golob, B.: A Feature-based Approach towards an Product Model Including Concetual Design Information; Computer-Aided Design, 2000, Vol. 32, 877-887
- [12] Reed, John A. and Afjeh, Abdollah A.: Computational Simulation of Gas Turbines – Part 1: Foundations of Component-based Models; Transaction of the ASME International Das Turbine & Aeroengines Congress & Exhibition, June 1999
- [13] Samareh, Jamshid A.: A Survey of Shape Parameterization Techniques; CEAS/ AIAA/ ICASE/ NADA Langley International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics; June 1999, Williamsburg, VA
- [14] Samareh, Jamshid A.: Status und Future of Geometry Modeling and Grid Generation for Design and Optimization; Journal of Aircraft, Vol. 36, No. 1, 97-104

Anschrift des Autors:

Carsten Subel

MTU Aero Engines GmbH

Postfach 500640

D-80976 München

E-Mail: carsten.subel@muc.mtu.de