

METHODE ZUR GESAMTHEITLICHEN, INTERDISZIPLINÄREN SPIELE- & SPALTE-ANALYSE BEI FLUGTRIEBWERKEN

K. Hain, E. Ebert, D. Waldner
MTU Aero Engines, Dachauer Str. 665, 80995 München

ÜBERSICHT

Die Aufgabe der Spaltauslegung bei Flugtriebwerken umfasst neben den typischen Dichtspalten auch sämtliche funktionsbedingten Spiele und Spalte. Spaltdefinition und -Analyse sind wesentliche Aufgaben, die sich ausgehend von der Konzeptphase über die eigentliche Auslegungsphase bis zum Ende der Verifikationsphase erstrecken. Dazu wird ein problemorientiertes Verfahren vorgestellt, welches zum einen die Ursachen für Spaltänderungen von den thermischen Dehnungen über Manöverlast-Verformungen bis hin zu Bauteil-Toleranzen, als auch die am Auslegungsprozess beteiligten Disziplinen integriert.

Wesentlich ist zunächst die Separation von Spaltgeometrie und Spaltänderungen: die Betriebsspaltgeometrie entsteht stets aus der Synthese der Nominal-Spaltgeometrie, definiert als CAD-Geometrie, und der totalen Spaltänderung, deren Ermittlung die Grundaufgabe der hier vorgestellten Methode ist.

Schlüssel dazu ist eine Superpositions-Methode, die eine kinematisch konsistente Überlagerung von allgemeinen, als lokal zu betrachtenden Bauteilverformungen zu den Spalttranslations-Vektoren vornimmt. Als Bauteilverformungen sind dabei nicht nur Verformungen infolge Temperatur und Lasten, sondern auch Toleranzen und Spiele zu verstehen. Die Ermittlung dieser Bauteil-Verformungen ist nicht Gegenstand der Methode; sie gelten als Input aus anderen Quellen und Disziplinen, z.B. FE-Rechnungen, und werden dort mit spezifischen Verfahren entsprechend ihrer jeweiligen Ursache und Konstruktions-Reife generiert.

Im Rahmen dieses Beitrags wird ein auf den Annahmen statisch bestimmter Systeme und kleiner Verformungen basierender Starrkörper-Superpositions-Algorithmus vorgestellt.

1 EINLEITUNG

Die steigenden technologischen und wirtschaftlichen Anforderungen an Turbofantriebwerke erfordern eine optimale Auslegung der verbrauchsrelevanten primären und sekundären Dichtspalte. Aber auch Engstellen zwischen rotierenden und stehenden Bauteilen müssen so klein wie möglich gehalten werden, um Baulänge und Gewicht von Triebwerken zu minimieren. Für die Funktion ausschlaggebende Spalte und Überlappungen, wie z.B. in Bauteil-Aufhängepunkten, können u. U. auch flugsicherheits-relevant sein.

Gegenwärtig erfolgt die Spaltauslegung bei MTU Aero Engines nach sehr unterschiedlichen Methoden, die sehr spezifisch auf die verschiedenen TWK-Komponenten und die unterschiedlichen Einfluss- und Spaltegruppen abgestimmt sind. Andererseits werden gewisse Effekte nur überschlägig berücksichtigt. Die Spaltauslegung kann heute nur von einigen wenigen, speziell eingearbeiteten Mitarbeitern durchgeführt werden.

Eine gesamtheitliche und durchgängige Vorgehensweise, die derzeit bereits in Ansätzen vorhanden ist, würde gerade die Kompetenz-Problematik nachhaltig entlasten und zielt zusätzlich auf

- eine Verbesserung der Produktqualität,
- einer Reduzierung der Durchlaufzeiten und Entwicklungskosten,
- und einer Stabilisierung des Prozesses.

Im Folgenden wird nur das Prinzip der Methode und deren Anwendung für die Spalteanalyse beschrieben; der Beitrag geht nicht auf die Umsetzung in einem IT-Tool ein.

2 FORMELZEICHEN UND BEZEICHNUNGEN

Fett-Gedruckte Größen sind stets Vektoren

- $\mathbf{u}_R, \mathbf{u}_S$ Absolut-Translation von Spaltufer R, S;
 \mathbf{D}_U Relativ-Translation des Spaltufers R gegenüber Spaltufer S;
 \mathbf{u}_{kl} Absolut-Translationsvektor des Punktes l auf Bauteil k (im globalen Verschiebungs-Koordinatensystem);
 $u_{i,kl}$ Vektorkomponente i (z.B. 1,2,3) des Absolut-Translationsvektors \mathbf{u}_{kl} ;
 \mathbf{v}_k Starrkörper-Translationsvektor des Bauteils k;
 \mathbf{w}_{kl} Bauteil-Verformungsvektor des Punktes l auf Bauteil k (im lokalen Bauteil-Verschiebungs-Koordinatensystem);
 $w_{i,kl}$ Vektorkomponente i (z.B. 1,2,3) des Bauteil-Verformungsvektors \mathbf{w}_{kl} ;
 \mathbf{y}_{kl} Ortsvektor des Punktes l auf Bauteil k im lokalen Bauteil-Koordinatensystem;
 \mathbf{e}_{kl} Bauteil-Drehvektor des Punktes l auf Bauteil k (im lokalen Bauteil-Verschiebungs-Koordinatensystem);
 \mathbf{f}_{kl} Absolut-Drehvektor des Punktes l auf Bauteil k (im globalen Verschiebungs-Koordinatensystem);
 \mathbf{w}_k Starrkörper-Rotationsvektor des Bauteils k.

Indices:

Indexgruppe i,kl: links vom Komma: Vektorkomponente;
rechts vom Komma: Ort;

Indexgruppe der Form kl bedeutet: Punkt l auf Bauteil k

Abkürzungen:

- FE Finite Element (Methode)
GA General Arrangement =
= Triebwerks - (bzw. Modul-) Längsschnitt
ND Niederdruck
TWK (Flug-) Triebwerk
WEM whole engine model =
= dynamisches Gesamt-TWK-FE-Modell

3 AUFGABEN EINER SPALTEANALYSE UND DEREN INTEGRATION IN DEN AUSLEGUNGSPROZESS

3.1 Spalte (Gegenstand der Spaltanalyse)

Jede kritische Engstelle zwischen benachbarten Bauteiloberflächen soll weiterhin als Spalt betrachtet werden und ist somit Gegenstand einer umfassenden Spaltanalyse für eine TWK's-Komponente. Neben den zunächst augenfälligen Dichtspalten gehören dazu auch alle funktionsrelevanten Engstellen zwischen benachbarten Bauteilen, sowie funktionswichtige Überlappungen von Bauteilpartien. Schon ab der Konzeptphase einer TWK's-Komponente sind typischerweise die folgenden „Spalte“ zu definieren bzw. zu analysieren (BILD 3.1):

- Axialabstände zwischen aufeinander folgenden Schaufelreihen;
- Vorab-Schätzung der zu erwartenden Laufspalte an den wirkungsgrad-relevanten Dichtstellen, Bewertung von Spalthaltungs-Maßnahmen;
- Erforderliche Axial-/Radialspalte zwischen aufeinander folgenden Schaufelplattformen und Deckbänder, bzw. erforderliche Überlappungen;
- Als Sonderfall: Heiß-Kalt-Transformation der Gaskanal-Geometrie, d.h. Bestimmung derjenigen Gaskanal-Geometrie im (kalten) Aufbauzustand, die sich im Auslegungs-Betriebszustand gerade zu der gewünschten Betriebs- Gaskanal-Geometrie verformt ;
- Umfangsspalte und -Überlappungen von segmentierten ringförmigen Baugruppen, wie Leitapparate, Kanalpartien, etc.
- Funktionswichtige Spalte (Spiele) und Überlappungen an wichtigen Funktionsflächen, wie z.B. Bauteil-Anlageflächen (Vermeidung von Verklemmung bzw. Anlageverlust);
- Endgültige Festlegung der Nominal-Kaltspalte und Analyse des Betriebsspalt-Verhaltens aller Dichtspalte, ohne und mit Anstreif- oder Einlaufbelägen.

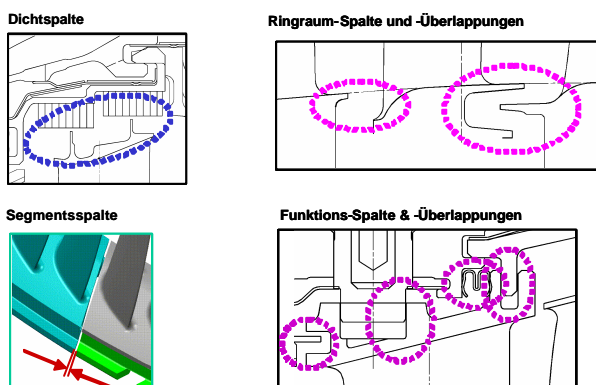


BILD 3.1: Typische Spaltstellen einer ND-Turbine

3.2 Ursachen für Spaltänderungen

Alle Effekte, die eine Änderung der nominalen (kalten) Spalt-Geometrie bewirken, sind in einer umfassenden Spaltanalyse zu berücksichtigen. Diese sollen für die

weiteren Betrachtungen in die folgenden 3 Gruppen unterteilt werden:

- a) Spaltänderungen infolge innerer Lasten:
entstehen durch den Betrieb des Triebwerkes selbst, d.h. durch Bauteil-Verformungen infolge Temperatur, Drehzahl, Gaskräfte und -drücke.
Die durch innere Lasten verursachten, in der Regel rotationssymmetrischen Spaltänderungen sind eindeutig den (stationären oder transienten) Betriebszuständen des Triebwerks zuordenbar.
- b) Spaltänderungen durch äußere Lasten:
entstehen durch Kräfte, die dem Triebwerk von außen aufgeprägt werden, insbesondere Massenkräfte durch Flugmanöver (g-Lasten, Kreiselmomente), aber auch Kräfte durch die TWK's-Aufhängung und über sonstige Verbindungsstellen mit Zelle oder Gondel.
Derartige Spaltänderungen sind primär Flugzuständen und -manövern zuordenbar und i.a. nicht rotationssymmetrisch.
- c) Spalt-Abweichungen und -änderungen durch Bauteiltoleranzen und Spiel in Bauteil-Anlenkpunkten:
Durch Toleranzen verursachte Abweichungen von der Nominalgeometrie sind als permanent wirkende, statistische Effekte zu verstehen. Bauteil-Spiele werden hingegen als Spaltänderungen nur dann wirksam, wenn, aus welchen Gründen auch immer, ein Wechsel der Anlageflächen an Bauteil-Verbindungsstellen erfolgt (z.B. durch Lastrichtungsumkehr bei Lagern, Pumpstößen, etc.).
Auch diese Effekte bewirken Abweichungen von der Nominal-Spaltgeometrie und müssen daher in einer gesamtheitlichen Spaltanalyse ebenfalls wie Spaltänderungen berücksichtigt werden.

3.3 Integration in den Auslegungsprozess

Die Spaltdefinition/-analyse ist eine modulare d.h. bauteilübergreifende Aufgabe, welche die gesamte Konzept-, Auslegungs- und Verifikationsphase in Form eines bauteilübergreifenden Iterationsprozesses begleitet:

- In der Konzeptphase gilt es, die Größe von konzeptbeeinflussenden Spalten bzw. Überlappungen auf Basis einiger weniger vorläufiger Daten abzuschätzen, sowie die Wirksamkeit von spaltbeeinflussenden Maßnahmen zu bewerten.
- In der eigentlichen Auslegungsphase (detail design) liefert die Spaltanalyse direkten Input in die Detailgestaltung der Bauteile, nun auf Basis von analytisch ermittelten Bauteil- und Strukturverformungen.
- In der Verifikationsphase (Testphase) sind die analytischen Modelle und Annahmen zu kalibrieren.

3.4 Abzuleitende Anforderungen an eine umfassende Spaltanalyse-Methode

Eine Methodik für eine umfassende Spaltanalyse muss den in den Kap. 3.1. bis 3.3. dargelegten Rahmenbedingungen Rechnung tragen; die Hauptanforderungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- a) Kinematisch- und auftritts-konsistente Überlagerung der aus den drei Ursachengruppen resultierenden Bauteil-Formabweichungen zur totalen Spaltänderung und Betriebsspaltgeometrie;

- b) Einsetzbar entlang des gesamten Gestaltungsprozesses; von einer frühen Phase mit Näherungen und Schätzungen bis in der Verifikationsphase die Spaltrechnerungen verifiziert werden.

4 SPALT UND SPALTÄNDERUNG, METHODENSPEZIFISCHE VEREINFACHUNGEN

4.1 Spaltgeometrie und Spaltänderungen

Wie bereits ausgeführt soll jede kritische Engstelle zwischen eng benachbarten Bauteiloberflächen als Spalt, die diesen Spalt bildenden lokalen Oberflächenbereiche der zugehörigen Bauteile weiterhin als Spaltufer bezeichnet werden. Ein Spalt wird somit stets durch zwei Spaltufer gebildet, wobei es unerheblich ist, ob eines der beiden Spaltufer statisch und das andere rotierend, oder beide statisch oder beide rotierend sind.

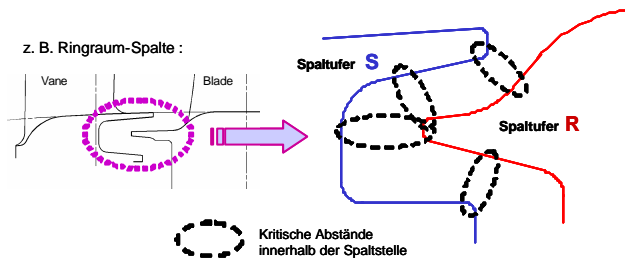


BILD 4.1: Spaltstelle im Detail

Die Detail-Nominal-Geometrie der Spaltufer wird durch die CAD-Modelle der beiden beteiligten Bauteile und die Spaltgeometrie selbst schließlich durch den CAD-Zusammenbau (Assembly, DMU) definiert (BILD 4.1). Hervorzuheben ist, dass für eine Spaltanalyse die lokale Feingeometrie (Genauigkeit < 0.1mm, incl. Rundungen und Fasen, etc.) wichtig ist.

Im Betrieb ändert sich diese Nominal-Spaltgeometrie durch die in Kap. 5.2 aufgeführten Ursachen und bildet den Betriebsspalt. Im allgemeinen Fall kann diese Geometrieänderung durch eine Translations-Verschiebung jedes Punktes beider Spaltufer beschrieben werden (BILD 4.2.a). Diese Verschiebungs-Verteilung entlang der Spaltufer lässt sich aber auch als die Überlagerung der Translations-Verschiebung eines charakteristischen Punktes der Spaltufer-Kontur, plus einer Rotation und einer Eigenverformung der Kontur selbst beschreiben (BILD 4.2.b).

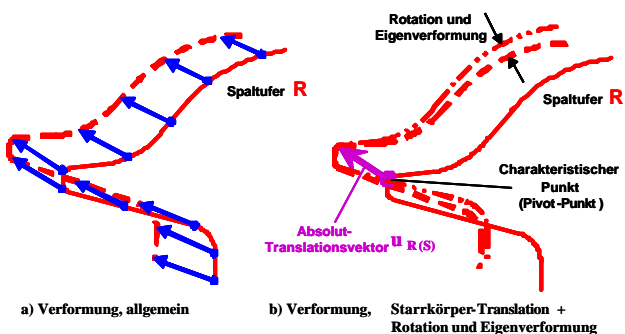


BILD 4.2: Verschiebungen und Verformungen eines Spaltufers

Die nachfolgend vorgestellte Methode basiert nun darauf, dass in praktischen Fällen und im Hinblick auf die ohnehin inhärente Fehlerproblematik bei Spaltanalysen (Differenz zweier etwa gleich großer Zahlen) Rotation und Eigenver-

formung einer Spaltkontur gegenüber der Translation (eines charakteristischen Punktes eines Spaltufers) vernachlässigt werden können. Gegebenenfalls muss die Ausdehnung einer einzelnen Spaltstelle gerade so gewählt werden, dass eben Rotation und Eigenverformung vernachlässigt werden dürfen. Die wesentliche Vereinfachung der vorliegenden Methodik besteht somit darin, dass nur die Starrkörper-Translation der Nominal-Spaltufer-Konturen als Spaltänderung berücksichtigt wird.

Mit dieser Voraussetzung entsteht die Betriebsspalt-Geometrie aus der Nominal-Kaltspalt-Geometrie durch die vektorielle Translation der beiden Spaltufer:

$$\begin{aligned} \text{Betriebsspalt-Geometrie} &= \\ &= \text{Nominal-Kaltspalt (-Detail) -Geometrie} + \\ &\quad \text{Translation Spaltufer R} + \text{Translation Spaltufer S} \end{aligned}$$

Diese Betrachtungsweise erlaubt die separate Behandlung von Geometrie einerseits und Spaltänderungen andererseits (BILD 4.3):

(Kalte) Nominal-Spalt-Geometrie :

ist stets definiert durch die produktiven CAD-Modelle und -Assemblies. Hier erfolgen die Geometrie-Änderungen entsprechend dem Design-Fortschritt; nur hier wird Bauteilgeometrie definiert.

Verformungs-Modelle, wie z.B. FE-Netze, bilden die Feingeometrie, wie sie für Spalte wichtig sind, meist nicht nach und werden aus Aufwandsgründen nicht ständig aktualisiert.

Spaltänderungen = Spalt-Translationen

resultieren aus den in Kap. 3.2 aufgeführten Ursachen und sind der primäre Output der hier vorgestellten Spaltanalyse-Methodik.

Diese Spaltänderungen sind im Rahmen der Näherungen unabhängig von den oben genannten konstruktiven Änderungen der Bauteil-Geometrie (außer bei Konzeptänderungen oder Geometrieänderungen im großen Maßstab).

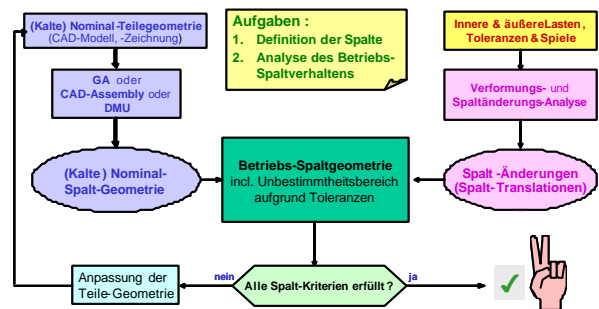


BILD 4.3: Spaltanalyse-Prozess

4.2 Absolut- und Relativ-Spalt-Translationen

Entsprechend der in Kap. 4.1 beschriebenen Vorgehensweise sind die folgenden zwei Darstellungen der Spalt-Translationen und damit des Betriebsspalt denkbar:

- Verschiebung beider Spaltufer um ihre jeweiligen Absolut-Translationsvektoren \mathbf{u}_R und \mathbf{u}_S (BILD 4.4), dabei entsteht auch die tatsächliche Lage des Spaltes im Betrieb.
- Festhalten des einen Spaltufers (= Bezugs-Spaltufer) und Verschieben des gegenüberliegenden Spaltufers

um den Relativ-Translationsvektor Δu (BILD 4.5); dabei wird allerdings nur die Spaltgeometrie zwischen den Spaltufern richtig dargestellt; die Informationen über Lage innerhalb der Komponente geht verloren. Dies reicht aber in den meisten Fällen für die Beurteilung des Spaltverhaltens völlig aus und ist die übliche Standard-Darstellung.

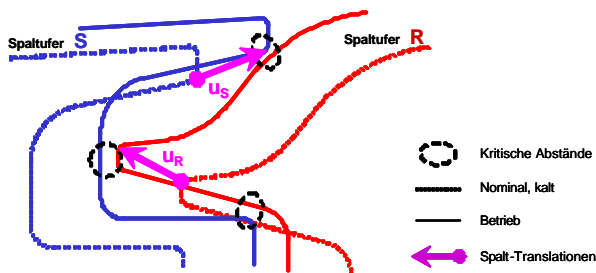


BILD 4.4: Betriebsspalt aus Absolut-Spalt-Translationen

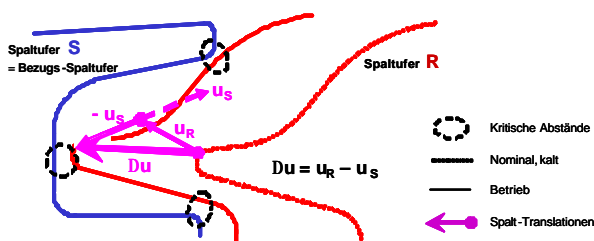


BILD 4.5: Betriebsspalt aus Relativ-Spalt-Translation Δu

5 SUPERPOSITIONS-METHODIK ZUR ERMITTLUNG DER SPALT-TRANSLATIONSVEKTOREN

5.1 Begründung und Anforderungen

Nach Hauptaufgabe a. in Kap. 3.4 ist eine Superpositions-Methodik erforderlich, welche die auf Bauteilebene stattfindenden Bauteilverformungen (= Abweichungen von der Bauteil-Nominalgeometrie) überlagert und die an den Spaltstellen wirksamen Absolut-Translationsvektoren u_R und u_S ermittelt. Hierbei soll zunächst unterschieden werden, ob es sich bei den „Bauteil-Verformungen“ um durch Belastungen verursachte Verformungen oder um (quasi-) permanente Abweichungen durch Spiele und Toleranzen handelt.

5.1.1 Superpositions-Methodik für Spalt-Translationen infolge innerer und äußerer Lasten

Der Wunsch nach einem einzigen FE-Modell mit dem sowohl die durch die inneren als auch die äußeren Lasten verursachten Verformungen vorhergesagt werden können, ist offensichtlich, da hierdurch Aufwände sowohl für die Überlagerung als auch für eine Datenverwaltung gespart werden könnten. In der industriellen Praxis sind die unterschiedlichen Anforderungen an die FE-Modelle beim derzeitigen Stand der Technik allerdings nicht sinnvoll in einem Modell zu vereinen. Man denke dabei z.B. an ein Gesamt-TWK's-Modell (WEM), welches in der Regel mittels Schalenelementen modelliert werden muss, während die Verformungen aufgrund der inneren Lasten in einem Modul eine genauere Modellierung verlangt und daher entweder 2D-axialsymmetrisch oder mit 3D-Elementen

modelliert wird. Selbst wenn ein solches FE-Modell technisch zu realisieren wäre, ist ein solches Vorgehen im industriellen Alltag aus folgenden Gründen nicht sinnvoll:

- Ergebnisse, anderer Fachdisziplinen wie z.B. Strukturmechanik oder Wärmetechnik, die mit großem Aufwand erzeugt wurden, würden nicht weiter Verwendung finden. Stattdessen würde ein erneuter quasi- paralleler Modellaufbau stattfinden und damit nochmals erheblich Zeit und Ressourcen erfordern.
- ein solcher extra FE-Modellaufbau erfordert Fachkenntnisse aus mehreren Analytik-Disziplinen, die nur sehr langwierig zu erlangen sind.
- Integration von Verformungsergebnissen von Partner-Komponenten ist damit noch ungelöst.
- Vorläufige Aussagen in frühen Designphasen wären nicht möglich.

Für eine größtmögliche Flexibilität in Bezug auf die Nutzung von Bauteil-Verformungen aus den unterschiedlichsten Quellen, wird deshalb als kennzeichnendes Merkmal der vorliegenden Methode ein Superpositions- oder Koppelungs-Algorithmus eingeführt. Dieser hat die Aufgabe, Bauteil-Verformungs-Datensätze beliebiger Unterstrukturen oder Einzelbauteile unter Berücksichtigung der kinematischen Koppelungsbedingungen an den Schnittstellen zwischen diesen Unterstrukturen zu überlagern. Ergebnis sind die in Kap. 4.2 eingeführten Absolut-Spalt-Translationsvektoren. Dies ist gleichbedeutend mit einer Transformation der auf lokale Verschiebungs-Koordinatensysteme (w_1, w_2, w_3) bezogenen Verformungen der Unterstrukturen (Baugruppen, Bauteile, Bauteilpartien) in das für das Gesamtsystem geltende globale Verschiebungs-Koordinatensystem (u_1, u_2, u_3) (BILD 5.1).

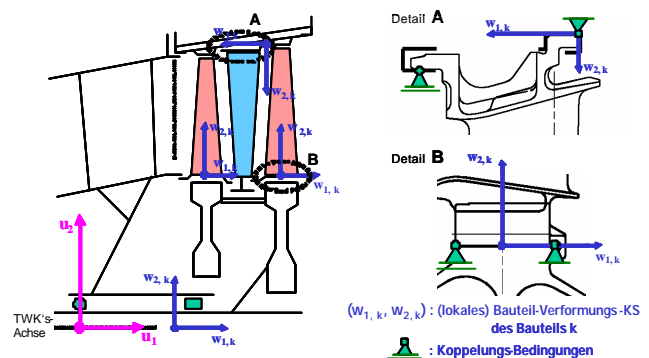


BILD 5.1: Aufbau des Gesamtsystems aus Unterstrukturen und Bauteilen

Durch die dadurch erreichte Unabhängigkeit von Methode und Quelle der Ermittlung der lokalen Bauteilverformungen ist dieser Superpositions-Algorithmus die Grundlage für die Integration des Verfahrens in den interdisziplinären und kontinuierlich fortschreitenden Auslegungsprozess:

➤ Interdisziplinäre Integration :

Weitgehende Nutzung der Ergebnisse aus den jeweiligen spezialisierten (strukturmechanischen) FE-Modellierungen der entsprechenden Fachdisziplin; keine redundante Berechnungen der Strukturverformungen aus inneren und äußeren Lasten in einem Spalte-FE-Gesamt-Modell (siehe oben).

Die Strukturverformungen der einzelnen Baugruppen werden separat (damit bezogen auf unterschiedliche Verformungs-Nullpunkte) mit meist unterschiedlichen, für die jeweilige Baugruppe und Belastung sehr spezifi-

schen FE-Codes mit komplexen Randbedingungen und Werkstoff-Gesetzen ermittelt; dadurch hohe Genauigkeit; Verformungen durch externe Lasten (Manöver) aus den originären Dynamikmodellen (whole engine model, Rotordynamik-Modell) werden genutzt.

Ein solcher Koppelungs-Algorithmus ermöglicht insbesondere auch die Integration der Verformungsrechnungen mehrerer Entwicklungspartner, wenn Spalte der eigenen TWK's-Komponente durch Strukturverformungen der Partner-Komponenten beeinflusst werden.

Bei in Zukunft deutlich leistungsfähigeren FE-Tools und Rechnern ist jederzeit der Übergang zu immer umfassenderen FE-Strukturmodellen bis hin zum oben diskutierten Gesamt-FE-Modell gegeben.

➤ Zeitliche Integration :

Konzept- oder frühe Auslegungsphase:

Verformungs-Grobabschätzung einzelner Bauteile bzw. Bauteilpartien, „Zusammenbau“ mittels des Superpositions-Algorithmus (siehe Kap. 5.2.2); oder

Übernahme bereits bekannter Verformungsdaten von Baugruppen ähnlicher TWK's-Komponenten;

Spätere Auslegungsphase :

Nutzung der Verformungs-Ergebnisse aus den Strukturmechanik-FE-Analysen der Einzelbauteile bzw. Baugruppen;

5.1.2 Superpositions-Methodik für Spalt-Translationen infolge Toleranzen und Spiele

Die Berücksichtigung des Toleranzeinflusses bei Spaltanalysen bedingt das Bilden von Maß- bzw. Toleranzketten. Innerhalb der Bauteile mit einem in sich geschlossenen Vermassungssystem ist dies mit relativ einfachen Mitteln (z.B. Tabellenkalkulation) und kommerziell erhältlichen, meist in CAD-Systeme integrierte Toleranz-Tools möglich. Die notwendige bauteil-übergreifende Überlagerung dieser Toleranzeffekte erfordert in jedem Fall einen, die kinematischen Bauteil-Anlenkbedingungen berücksichtigenden Superpositions-Algorithmus, wie er auch in einigen modernen, 3D-basierten Toleranztools integriert ist.

Spiel in Bauteil-Anbindungsstellen ist prinzipiell gesehen ein Kontakt-Problem und erfordert bei entsprechenden FE-Codes einen sehr großen Rechenaufwand.

Für Spaltanalysen, bei denen ausschließlich Verschiebungen (und keine Spannungen) interessieren, sind nur die durch Anlagewechsel verursachten Spaltänderungen interessant. Bei Anlagewechsel erfolgt in einer spielbehafteten Verbindungsstelle eine (kleine) Relativ-Verschiebung der beiden Bauteile zueinander. Auch hier ist wiederum ein Superpositions- (Koppelungs-) Algorithmus erforderlich, der diese Relativ-Verschiebung in die resultierenden Absolut-Translationen an den Spalten umsetzt. Ein Anlagewechsel bewirkt allerdings auch ein Wechsel der wirklichen Toleranzkette, weshalb die Effekte aus Toleranzen und Anlenkspielen miteinander gekoppelt sind.

So ist ein weiteres Kennzeichen der vorgestellten Methode, dass der für die Ermittlung der Absolut-Spalt-Translationen aus Bauteil-Verformungen entwickelte Superpositions-Algorithmus auch für die Überlagerung der Einflüsse aus Toleranzen und Spiele benutzt wird.

Dieser Superpositions-Algorithmus ermöglicht auch hier die Integration der Toleranz-Analyse bezüglich Spalte in den fortschreitenden Design-Prozess:

- Konzept- oder frühe Auslegungsphase: Keine Zeichnungen vorhanden, damit auch kein CAD-basiertes Vermassungssystem (wäre notwendig für CAD-basierte Toleranzanalyse-Tools); Deshalb manuelle Eingabe geschätzter Toleranzen nur für einige Hauptmaße auf Bauteil-Ebene.
- Späte Auslegungsphase : CAD-Vermassungssystem vorhanden; Bilden der Toleranzkette innerhalb der Bauteile durch CAD-basierte Toleranz-Überlagerung; bauteilübergreifende, kinematisch konsistente Überlagerung zu Spalt-Effekten durch gemeinsamen Superpositions-Algorithmus.

5.2 Starrkörper-Superpositions-Algorithmus für statisch bestimmte Strukturen

5.2.1 Gleichungssystem für das Starrkörperproblem

Betrachtet wird eine Modul-Struktur, die aus einer Reihe von Einzelbauteilen oder Bauteilgruppen (Unterstrukturen) aufgebaut ist, deren Eigenverformungen wie in Kap. 5.1 beschrieben kinematisch konsistent zu überlagern sind.

Ist diese Modul-Struktur intern und extern statisch bestimmt, so werden durch die Kopplung der Unterstrukturen und Bauteilen keine zusätzlichen Kräfte erzeugt und somit deren Eigenverformungszustand nicht mehr verändert. Die einzelnen Komponenten der Gesamtstruktur erfahren hierbei ausschließlich Starrkörper-Bewegungen.

Diese Voraussetzung liegt der bisherigen Ausbaustufe des Verfahrens zugrunde, das den in Kap. 5.1 begründeten Superpositionsalgorithmus auf ein reines Starrkörper-Problem reduziert.

Das betrachtete Gesamtsystem (TWK bzw. Modul) ist durch ein idealisiertes, intern und extern statisch bestimmtes kinematisches Spaltmodell abzubilden, das sowohl die Aufteilung in „Bauteile“ als auch die kinematischen Koppelungsbedingungen zwischen diesen „Bauteilen“ definiert (entsprechend BILD 5.1).

5.2.1.1 Herleitung des Gleichungssystems

Unter der zusätzlichen Annahme kleiner Starrkörper-Drehbewegungen w_k zusammen mit der Grundvoraussetzung einer intern wie extern statisch bestimmten Triebwerksstruktur lässt sich das folgende lineare Gleichungssystem herleiten:

- a) Beziehungen zwischen globalen und lokalen Bauteil-Verschiebungs- und Drehvektoren aus der vektoriierten Addition der Eigen-Bauteil-Verformung und der Starrkörperbewegung des Bauteils k (siehe BILD 5.2):

Für die Verschiebungen der Bauteilpunkte kl :

$$(5.1) \quad \mathbf{u}_{kl} = \mathbf{w}_k + \mathbf{v}_k + (\mathbf{w}_k \times \mathbf{y}_{kl})$$

Für die Drehungen der Bauteilpunkte kl :

$$(5.2) \quad \mathbf{f}_{kl} = \mathbf{e}_k + \mathbf{w}_k$$

- b) Kopplungsbeziehungen zwischen verbundenen Bauteilpunkten zweier unterschiedlicher Bauteile:

Eine Kopplung ist definiert durch eine Verbindung des Punktes l auf Bauteil k (= Punkt kl) mit Punkt l' auf Bauteil k' (=Punkt $k'l'$).

Zu betrachten sind hier nur Absolut-Verschiebungen \mathbf{u}_{kl} und Absolutdrehungen \mathbf{f}_{kl} der Koppelpunkte kl und $k'l'$.

Entsprechend der Kopplungs-Bedingungen (= Freiheitsgrade, die gebunden sind) ergeben sich unterschiedliche Kopplungsgleichungen (5.3.x), z.B.

Feste Verbindung, d.h. kein Freiheitsgrad:

$$(5.3.1) \quad \mathbf{u}_{kl} = \mathbf{u}_{k'l'} \quad \& \quad \mathbf{f}_{kl} = \mathbf{f}_{k'l'}$$

Verbindung mit einem translatorischen Freiheitsgrad \mathbf{f}_1 (als Einheitsvektor):
 nur die Bewegungskomponenten senkrecht auf \mathbf{f}_1 werden übertragen

$$(5.3.2) \quad \mathbf{f}_1 \times (\mathbf{u}_{kl} \times \mathbf{f}_1) = \mathbf{f}_1 \times (\mathbf{u}_{k'l'} \times \mathbf{f}_1) \quad \& \quad \mathbf{f}_{kl} = \mathbf{f}_{k'l'}$$

Verbindung mit zwei translatorischen Freiheitsgraden = mit einer Gleitebene mit dem Normalen- (Einheits-) vektor \mathbf{n} :

nur die Verschiebungskomponenten senkrecht zu dieser Gleitebene werden übertragen:

$$(5.3.3) \quad \mathbf{u}_{kl} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{u}_{k'l'} \cdot \mathbf{n} \quad \& \quad \mathbf{f}_{kl} = \mathbf{f}_{k'l'}$$

usw..

Entsprechend können für weitere fundamentale, aber auch für in der Praxis der Flugtriebwerke häufig vorkommende spezielle Verbindungen (z.B. Zentrierbunde, Speichenzentrierungen) Koppelgleichungen angegeben werden. Diese können sowohl für echte 3D-Probleme, als auch für den im TWK-Bau sehr häufigen Fall des rotationsymmetrischen quasi-2D-Problems entwickelt werden.

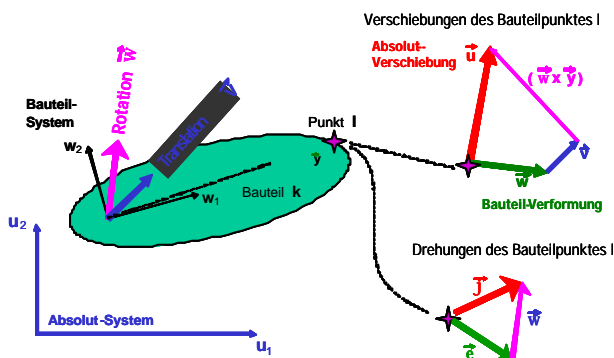


BILD 5.2: Zusammenhänge zwischen den betrachteten Verschiebungsgrößen

5.2.1.2 Lösung des Gleichungssystems

Wegen der Annahme kleiner Drehbewegungen w_k entsteht ein lineares Gleichungssystem für die unbekanntes Verschiebungsgrößen \mathbf{u}_{kl} und \mathbf{f}_{kl} , sowie die unbekanntes Starrkörper-Bewegungen \mathbf{v}_k und w_k . Es ist lösbar unter der Voraussetzung, dass alle Bauteile k untereinander und nach außen statisch bestimmt gelagert sind, d.h. wenn die Koppelbedingungen (5.3.x) nach b) entsprechend definiert sind. Das Gleichungssystem hat die allgemeine Form:

$$(5.4) \quad \begin{pmatrix} \text{Koeffizienten-Matrix} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{u}_{kl} \\ \mathbf{f}_{kl} \\ \mathbf{v}_k \\ w_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{w}_{kl} \\ \mathbf{e}_{kl} \end{pmatrix}$$

Durch Separation der Koppelgleichungen (5.3.x) sowie der Gleichungen (5.1) und (5.2) der gekoppelten Punkte von

den entsprechenden Gleichungen der nicht gekoppelten Punkte (freie Bauteilpunkte), lässt sich die Größe des simultan zu lösenden Gleichungssystems auf die Anzahl der gekoppelten Bauteilpunkte reduzieren. Mit den dann für alle Bauteile k bekannten Starrkörperbewegungen \mathbf{v}_k und w_k können die Absolut-Bewegungen \mathbf{u}_{kl} und \mathbf{f}_{kl} für alle freien Bauteilpunkte nach Gl. (5.1) und (5.2) sukzessive ermittelt werden.

Die Lösung selbst erfolgt durch Inversion der Koeffizientenmatrix des reduzierten Gleichungssystems, was pro Spaltenmodell nur einmal durchzuführen ist (Linearisierung wegen Annahme kleiner Starrkörper-Drehungen w_k).

Damit lassen sich die \mathbf{u}_{kl} durch eine einfache Matrizenmultiplikation mit den vorgegebenen Bauteilverformungen berechnen:

$$(5.5) \quad \mathbf{u}_{i,kl} = \sum_{m=1}^{n_k} \sum_{n=1}^{n_l(m)} \sum_{j=1}^3 \mathbf{d}_{ij,nn,kl} \cdot \mathbf{w}_{j,nn} + \sum_{m=1}^{n_k} \sum_{n=1}^{n_l(m)} \sum_{j=1}^3 \mathbf{g}_{ij,nn,kl} \cdot \mathbf{e}_{j,nn}$$

wobei die je Spaltenmodell konstanten Matrizen $[\delta_{ij,nn,kl}]$ und $[\gamma_{ij,nn,kl}]$ durch Aufteilung der invertierten Koeffizientenmatrix entstehen. Der 2. Term in (5.5) ist bei der bevorzugten Modellbildung (Gelenke statt fester Einspannungen, siehe Kap. 5.2.2) identisch Null und die Bauteilpunkt-Drehungen \mathbf{e}_{kl} daher nicht nötig.

Eine entsprechende Beziehung ließe sich auch für die \mathbf{f}_{kl} angeben, die jedoch hier nicht von Interesse ist, da die Drehungen selbst entsprechend den Annahmen von Kap. 4.1 bei der Spaltanalyse vernachlässigt werden.

Dieser Algorithmus ist als 3D-Methode mathematisch formuliert und programmiert, wird aber wegen der üblichen Rotationssymmetrie bei Triebwerks-Spaltemodellen bisher nur im 2D-Mode benutzt.

Im Folgenden wird die Anwendung dieses im Rahmen der genannten vereinfachenden Annahmen universelle Starrkörper-Superpositionsverfahren auf die einzelnen Spaltänderungs-Ursachen dargestellt.

5.2.2 Anwendung des Starrkörper-Superpositions-Verfahrens auf innere Lastarten

Entsprechend den Ausführungen in Kap. 5.1.1 geht es hier darum, die für einzelne Bauteile oder Baugruppen mit anderen Methoden ermittelten Bauteil-Verformungen zu den absoluten Spalt-Translationsvektoren kinematisch konsistent zu überlagern.

Grundlage hierfür ist ein aus dem Triebwerks-Längsschnitt (GA) abgeleitetes, rotationsymmetrisches 2D-Spaltemodell des betrachteten TWK-Moduls, dessen Aufteilung des Gesamtsystems in Einzel-„Bauteile“ sich an den aus anderen Quellen stammenden Bauteil-Verformungen orientiert. Ein geschlossener Verformungs-Datensatz definiert hierbei ein Bauteil k im Spaltenmodell.

➤ In der Konzept- und frühen Auslegungsphase sind in der Regel keine FE-Modelle vorhanden:

Modellierung der relevanten Bauteile als einfache Stab-, Schalen- und Scheibenelemente, deren Verformungen durch Temperatur, Fliehkraft und Gaslasten durch einfache Näherungen (z.B. lineare thermische Dehnungen,

Biegungen) ermittelt sind und die lokalen Verschiebungsvektoren w_{kl} für Gl. (5.5) darstellen. Dabei können reale Bauteile, wenn nötig, auch in einfache kleine Elemente zerlegt werden, die dann, allerdings statisch bestimmt, wieder zu koppeln sind (Beispiel: BILD 5.3).

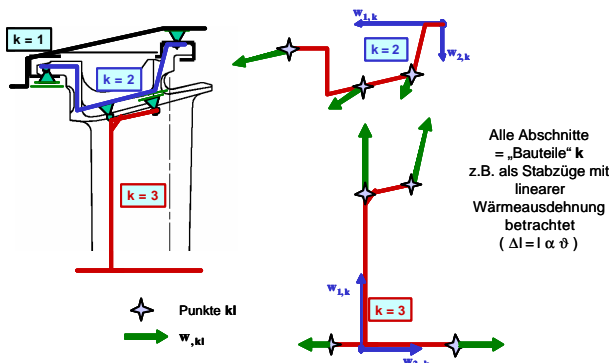


BILD 5.3: Zerlegung eines Bauteils in Stabelemente

- Nutzung von FE-Rechnungen der Wärmetechnik in einer fortgeschrittenen und späten Design-Phase für die Effekte aus inneren Lasten:

Typische FE-Modelle der Wärmetechnik enthalten nicht nur einzelne Bauteile, sondern ganze Module bzw. größere Baugruppen, da eine Betrachtung einzelner Bauteile aufgrund der lösungsabhängigen Randbedingungen nicht sinnvoll ist. Die Information, die bereits in dem thermischen FE-Modell beinhaltet ist, kann mittels automatischer Erzeugung eines mechanischen Modells zur Verformungsvorhersage benutzt werden [1].

Ein solches Modell kann als Ganzes in das Spaltmodell eingearbeitet werden.

- Nutzung von FE-Rechnungen der Strukturmechanik in einer späteren Design-Phase:

Ein geschlossenes FE-Netz definiert dabei ein „Bauteil“ k im Sinne des in Kap. 5.2.1 entwickelten Superpositions-Verfahrens. Die unterschiedlichen „Bauteile“ sind dann untereinander statisch bestimmt zu koppeln, so dass die gesamte, für die Spaltänderungen des betrachteten TWK-Moduls relevante TWK's-Struktur beinhaltet ist. Dazu gehören oft auch Strukturteile anderer TWK-Module (z.B. Welle für die Spalte der ND-Turbine, da das Festlager am Fan sitzt), die vom Entwicklungspartner zu liefern sind.

Den im Spaltmodell definierten Bauteil-Punkten kl sind die entsprechenden, normalerweise nächst gelegenen FE-Netz-knotenpunkte zuzuordnen; deren Verschiebungs-Komponenten bilden unmittelbar den Input w_{kl} für Gl. (5.5).

Typischerweise sind über die gesamte Auslegungsphase drei unterschiedliche Spaltmodelle für die inneren Lasten ausreichend.

Die Definition der Koppelbedingungen ist die eigentliche Abstraktionsaufgabe der hier vorgestellten Methode, so dass das Gesamtsystem intern und extern statisch bestimmt bleibt und dabei das Verformungsverhalten der gekoppelten Struktur dem der realen, oft statisch überbestimmten Struktur, möglichst nahe kommt. Da die Drehungen der Koppelpunkte aus FE-Rechnungen sehr ungenau bzw. nicht verfügbar sind, ist eine Koppelung über gelenkige „Auflager“ (z.B. Fest-Loslager) zu bevorzugen (siehe BILD 5.1).

Transiente Betriebsfälle (z.B. Beschleunigung von Idle nach Take-Off) erfordern vor der eigentlichen Superposition der Bauteilverformungen w_{kl} zu den Spalt-Translationen u_{kl} eine zeitliche Interpolation, da die Zeitpunkfolgen aus den FE-Rechnungen unterschiedlich sind. Dies ist auch sinnvoll, da die unterschiedlichen Bauteile oft ein sehr unterschiedliches Zeitverhalten haben.

5.2.3 Anwendung des Starrkörper-Superpositions-Verfahrens auf äußere Lastarten

Die Ermittlung der Strukturverformungen durch äußere Lasten (vor allem Manöverlasten) erfolgt primär in einem, das ganze TWK einschließenden dynamischen Modell, das sog. „whole engine model (WEM)“.

In einer frühen Entwurfsphase ist dies oft ein Balken-Masse-Modell. Später ist es als FE-shell-Modell der statischen und rotierenden Primärstrukturen des gesamten TWK's aufgebaut. Kompakte Bauteile wie Schaufeln, etc. sind meist nur so beinhaltet, dass die richtige Masse repräsentiert wird.

Das vorgestellte Starrkörper-Superpositionsverfahren für die Spaltanalyse ermöglicht, wie bei inneren Lasten, die Nutzung der Strukturverformungen aus dem WEM, gleich ob als Balken- oder FE-Modell.

Auch hier ist zunächst der Aufbau eines am TWK-Schnitt orientierten rotationssymmetrischen 2D-Spaltmodells erforderlich, wobei das WEM die Basis-„Bauteile“ definiert. Weitere erforderliche „Bauteile“ sind alle realen Bauteile zwischen diesem und den betrachteten Spaltstellen, die im WEM nicht (ausreichend) enthalten sind. Diese sind untereinander und gegenüber den WEM-Basisbauteilen wieder statisch bestimmt zu koppeln (BILD 5.4).

Durch den Superpositions-Algorithmus wird so die Übertragung der Verformungen der WEM-Struktur auf die Spaltstellen durch kinematisch konsistente Starrkörperbewegungen der dazwischen liegenden realen Bauteile beschrieben. Wegen der nicht-rotationssymmetrischen Verformungen bei diesen Lastarten muss diese Überlagerung (mit demselben Spaltmodell) für mehrere unterschiedliche Umfangspositionen durchgeführt werden.

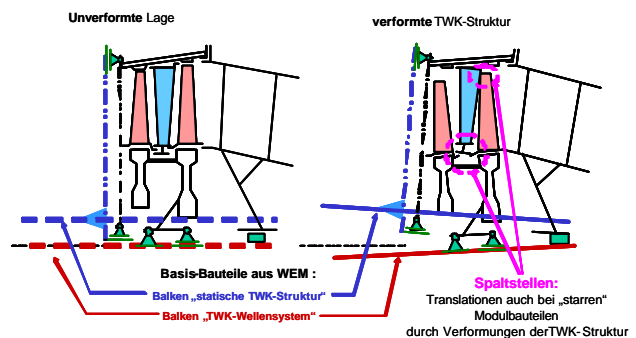


BILD 5.4: Ankopplung eines Turbinen-Spaltmodells in ein Balken-WEM

Eine solche Kopplung des Spaltmodells an ein WEM's ist vor allem dann notwendig, wenn das WEM von einem Entwicklungspartner bearbeitet wird und von diesem nur die Verschiebungen an den jeweiligen Modul-Interfaces bereitgestellt werden. Diese repräsentieren dann die einzigen „Bauteilverformungen“ w_{kl} als Input für die kinematische Superposition nach Gl. (5.5).

5.2.4 Anwendung des Starrkörper-Superpositions-Verfahrens auf Anlenkspiele und Toleranzen

5.2.4.1 Anbindungsstellen, Anlagekonfigurationen und Spaltmodelle (Begriffe)

Hierzu ist das Gesamtsystem i.a. in seine realen, aber lösbar verbundenen Bauteile aufzulösen und diejenigen Stellen, an denen die Bauteile miteinander in Verbindung stehen (weiterhin als Anbindungsstellen bezeichnet) zu identifizieren. Auf jedem der realen Bauteile lassen sich im Bereich dieser Anbindungsstelle Anlageflächen-Paare identifizieren, die bei

- einer festen Verbindung sich stets spielfrei berühren,
- einer spielbehafteten Verbindung sich abhängig von der Auflagerkraftrichtung berühren (d.h. im Eingriff sind) oder um das Anlenkspiel Abstand haben.

Da die Auswirkung von Anlenk-Spielen und Toleranzen auf die Spalte davon abhängig ist, welche Anlageflächen-Paare an den Anbindungsstellen im Eingriff sind, gilt es, die für die Spaltauslegung zu relevanten Anlagekonfigurationen vorab klar zu definieren.

Wechsel von Anlageflächen-Paare treten immer dann auf, wenn in einer spielbehafteten Anbindungsstelle die Auflagerkraft ihre Richtung umkehrt (BILD 5.5).

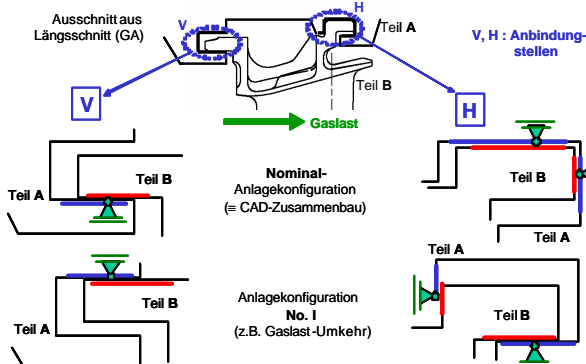


BILD 5.5: Anlageflächen und Anlagekonfigurationen

Basis ist diejenige Anlagekonfiguration, die im CAD-Zusammenbau (GA, Assembly, DMU) definiert wurde und die der im Normalbetrieb tatsächlich vorliegenden Anlegesituation entsprechen sollte = Nominal- Anlagekonfiguration (da diese die Nominalspalte definiert).

Daneben sind noch einige weitere (meist 2-3) Anlagekonfigurationen zu betrachten, die für die Spaltauslegung wichtig sind. Typische Beispiele sind:

- Montagesituation (vor allem bei Senkrecht-Montage), = Bauteile nehmen durch Eigengewicht andere Lage ein;
- Falls Umkehr von Wellenschüben während Betrieb auftritt (eigentlich unerwünscht);
- Außergewöhnliche Betriebsfälle, bei denen Gaskraft-Umkehrungen auftreten, z.B. compressor surge.

Für jede zu betrachtende Anlagekonfiguration ist im Allgemeinen ein eigenes kinematisches Spaltmodell zu erstellen. Allen diesen Spaltmodellen ist gemeinsam, dass sie die gleiche Auflösung des Gesamtsystems in die realen Bauteile aufweisen. Lediglich die Koppelung der Bauteile untereinander ist entsprechend der jeweiligen Anlagekonfiguration unterschiedlich (außer bei festen Verbindungen). Bei den spielbehafteten Anbindungsstellen

len sind nur die in der betrachteten Anlagekonfiguration sich tatsächlich im Eingriff befindlichen Anlageflächen-Paare zu koppeln, und zwar als Gelenk mit einer Gleit Ebene entsprechend den Anlageflächen (BILD 5.5). Diese Modelle sind die Grundlage für die Ermittlung der Spaltänderungen für beide Effekte, Toleranzen und Anlenkspiele, mit dem Starrkörper-Superpositions-Algorithmus.

Obwohl allgemein als 3D-Verfahren formuliert, sind in der Anwendung meist 2D-Spaltmodelle für den TWK-Längsschnitt ausreichend. Gegebenfalls gibt es partielle 2D-Modelle für andere Schnitte, in denen wichtige Spalte zu analysieren sind, z.B. Umfangs- (Segment-) Spalte.

5.2.4.2 Berücksichtigung des Nominal-Anlenkspiels (d.h. auf Basis nominaler Geometrie)

Beim Übergang von der Nominal- in eine andere Anlagekonfiguration bewegen sich die Anlageflächen einer Anbindungsstelle entsprechend dem dort vorhandenen Nominal-Spiel relativ zueinander; diese Relativbewegung lässt sich durch einen Verschiebungsvektor w_{Spiel} beschreiben (BILD 5.6).

Jede der Anlageflächen auf Bauteil B bewegt sich um diesen Vektor w_{Spiel} , was man als eine „Verformung“ $w_{\text{kl}} = w_{\text{Spiel}}$ der Anlageflächen auffassen kann. Dadurch wird es möglich, die resultierende Auswirkung aller nominalen Anlenkspiele auf die Spalte für jede Anlagekonfiguration nach dem Starrkörper-Superpositions-Algorithmus von Kap. 5.1 zu ermitteln.

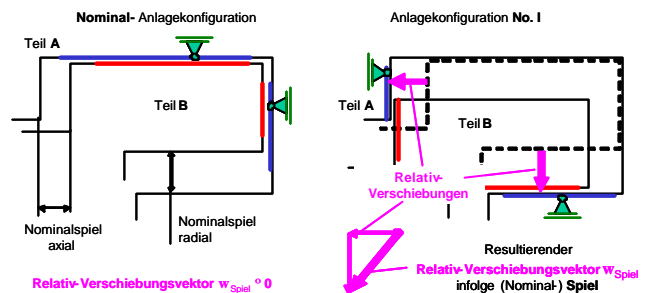


BILD 5.6: Relativ-Verschiebung infolge Anlenkspiel

Spezielle Verbindungselemente, z.B. Kugellager, sind so zu abstrahieren, dass sich o.g. Formalismus anwenden lässt.

5.2.4.3 Berücksichtigung der Fertigungstoleranzen

Hier wird vorausgesetzt, dass die entsprechend Kap. 5.2.4.1 betrachteten Anlagekonfigurationen stets erhalten bleiben, d.h. sie sind nicht abhängig von den Toleranzen.

Die Methode geht weiterhin davon aus, dass die Toleranz-Überlagerung innerhalb der Bauteile durch eine eigene, ggf. CAD-basierte Methode gebildet wird (analog FE-Verformungsergebnisse für bestimmte Strukturgruppen).

In einer frühen Entwurfsphase können diese bauteil-internen Toleranzsummen abgeschätzt sein oder von anderen ähnlichen Bauteilen „quergelesen“ werden. Später können sie auf Basis von aktuellen Bauteil-Zeichnungen/ -Modellen ermittelt und sowohl als konventionelle Toleranzfelder oder als statistische Verteilungen vorliegen.

Aus dieser bauteil-internen Toleranzketten-Bildung entstehen zunächst die Toleranzbereiche der auf diesem Bauteil liegenden Spaltufer-Konturen bezogen auf das

Bauteil-Datumssystem. Als Input in das Starrkörper-Superpositions-Verfahren werden zusätzlich die resultierenden Summen-Toleranzbereiche, ebenfalls bezogen auf das Bauteil-Datumssystem, aller relevanter Anlageflächen an allen Anbindungsstellen benötigt (BILD 5.7).

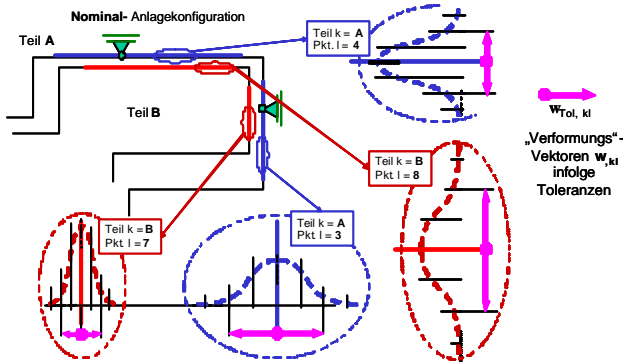


BILD 5.7: Toleranzbereiche der Anlageflächen

Auch hier übernimmt die Starrkörper-Superpositions-Methode nach Kap. 5.1 die anlagekonfigurations-spezifische (entsprechend dem zugehörigen Spaltmodell) und die kinematisch konsistente Überlagerung von Bauteilebene zum Gesamtsystem. Dazu wird die einseitige Toleranzbandbreite, entweder das 100%-Toleranzfeld oder z.B. die 2σ -Bandbreite, wiederum als „Verformung“ $w_{Tol, ki}$ der Anlagefläche l auf Bauteil k von der Nominal-Geometrie verstanden und dient direkt als Input in Gleichung (5.5). Gleichzeitig werden die für die betrachtete Anlagekonfiguration wirksamen Anlenkspiele (w_{Spiel}) nach Kap. 5.2.4.2 mit überlagert.

Ergebnis sind die absoluten Toleranzfelder aller Spaltufer für jede betrachtete Anlagekonfiguration, die ggf. um den Effekt der Anlenkspiele gegenüber der Nominallage (entsprechend Nominal-Anlagekonfiguration, siehe Kap. 5.2.4.1) verschoben und im allgemeinen Fall keine Rechtecke sind. Daraus lassen sich nach Kap. 4.2 auch die relativen Spalt-Toleranzfelder ermitteln, entweder als 100%- oder $n\text{-}\sigma$ -Toleranzfelder (siehe BILD 6.1, Anteil c).

Derzeit ist noch keine echte statistische Toleranz-Überlagerung implementiert; dies wird in einer zukünftigen Ausbaustufe angestrebt.

6 SPALT-AUSLEGUNG UND -ANALYSE

6.1 Darstellung der Überlagerung der unterschiedlichen Lastarten

Nach der Superpositions-Methodik von Kap. 5 sind die absoluten Spalt-Translationsvektoren und nach Kap. 4.2 auch die relativen Spalt-Translationen an allen interessierenden Spaltstellen bekannt. Diese sind aber noch den in Kap. 3.2 genannten einzelnen Einfluss- bzw. Ursachen-Gruppen zugeordnet.

Es gilt nun, diese Spalt-Translationen der verschiedenen Ursachen (innere und äußere Lasten, Toleranzen und Spiele) zur an jedem Spalt relevanten totalen Spalt-Änderung zu überlagern. Die Besonderheit hierbei ist die Abhängigkeit der einzelnen Einflussgruppen von jeweils unterschiedlichen Zuständen und Parametern:

- Die Spaltverschiebungen aus den inneren Lasten bilden die Basis der Überlagerung (BILD 6.1).

Diese sind eindeutig den Betriebszuständen des TWK's zuzuordnen. Es sind sowohl stationäre als auch transiente Betriebsfälle zu betrachten, bis hin zu einer kompletten typischen Flugmission.

Für Spalte, an denen absolut kein Anstreifen auftreten darf, sind auch seltenere Fälle, wie z.B. windmilling, zu untersuchen.

- Spaltverschiebungen aus äußeren Lasten (BILD 6.1) sind nur teilweise dem Verlauf der Flugmission zuordenbar (z.B. Landestöße), treten meist aber zufällig auf (z.B. Böen).

Im TWK-Lastenheft werden üblicherweise „normal-load“ und „limit-load“-Lastkollektive unterschieden. Ggf. sind noch andere, für bestimmte Flugphasen typische Lastkollektive zu betrachten.

Hier wird die folgende vereinfachte Betrachtungsweise eingeführt:

Die zu einem Lastkollektiv gehörenden Spalt-Translationsvektoren spannen jeweils einen Spaltänderungs-Bereich auf (BILD 6.1, Anteil b), so dass es standardmäßig einen „normal-load“ und einen „limit-load“-Bereich, ggf. aber auch zusätzliche solcher Bereiche gibt.

Die Überlagerung mit den Spaltänderungen aus inneren Lasten erfolgt nun in der Weise, dass der Spaltänderungs-Bereich eines Lastkollektivs mit seinem Nullpunkt an den betrachteten stationären inneren Betriebsfällen bzw. entlang der transienten Kurven aufgetragen wird (BILD 6.1). Hierbei gilt es natürlich, die für den aktuell betrachteten Spalt kritischen Überlagerungsfälle zu finden (siehe auch Kap. 6.2).

- Toleranzen erzeugen permanent vorhandene Spaltänderungen innerhalb der als Unsicherheitsbereiche zu verstehende Spalt-Toleranzfelder nach Kap. 5.2.4.

Das bedeutet, dass das jeweils zutreffende Spalt-Toleranzfeld an allen Überlagerungskombinationen von inneren und äußeren Spaltänderungen anzutragen ist (BILD 6.1, Anteil c), wobei es auch hier wieder gilt, die für die Spalte relevanten (kritischen) Situationen zu finden (siehe auch Kap. 6.2).

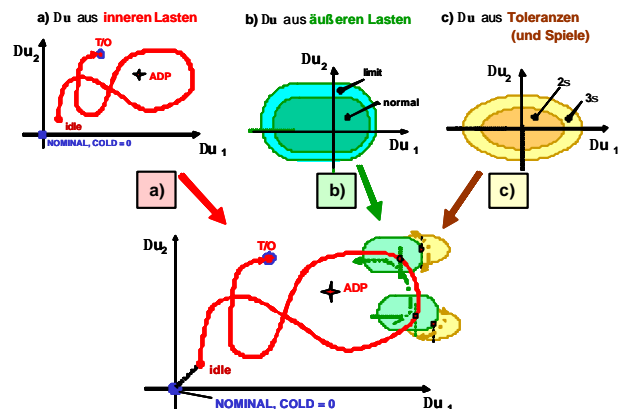


BILD 6.1: Überlagerung der Relativ-Spalt-Translationen aus den unterschiedlichen Ursachen-Gruppen.

6.2 Synthese von Spalt-Geometrie und Spalt-Änderungen

Schließlich gilt es, die Spalt-Nominal-Geometrie der momentan aktuellen CAD-Modelle und die Spaltänderungen

aus der Spalt-(Verschiebungs)-analyse entsprechend Kap. 4.1 zusammenzuführen.

6.2.1 Erzeugung der erforderlichen (kalten) Nominalspalt-Geometrie (Spaltdefinition)

BILD 6.2 erläutert die Vorgehensweise bei der Generierung eines allgemeinen 2D-Nominalspaltes:

Zunächst ist aus den totalen Spaltänderungen nach Kap. 6.1 die, den Bewegungsbereich einhüllende Grenzkurve zu ermitteln (BILD 6.2). Dabei sind entsprechend den Spaltauslegungs-Kriterien (z.B. kein Anstreifen unter allen Toleranz- und limit-load-Bedingungen erlaubt) die maßgebenden Überlagerungsfälle von inneren, äußeren und Toleranz-Spaltänderungen zu definieren und wie in Kap. 6.1 beschrieben zu überlagern.

In der Regel ist die Nominal-Kontur eines der beiden Spaltufer (hier: R-Spaltufer) als fix bzw. relativ fix zu sehen. Die Nominallage des charakteristischen Konturpunktes, der als Pivot-Punkt des (R-) Spaltufers zu verstehen ist, definiert nun den Ursprung des globalen Spaltverschiebungs-Koordinatensystems innerhalb der betrachteten Spaltstelle.

Die Bewegung dieses Pivot-Punktes mit der anhängenden (R-) Spaltufer-Kontur entlang der o.g. resultierenden Einhüllenden, erzeugt die Grenzkurve des vom (R-) Spaltufers während der betrachteten Betriebsweise tatsächlich beanspruchten Raumes.

Ist nach dem Spaltauslegungs-Kriterium z.B. kein Anstreifen erlaubt, so darf dieser vom (R-) Spaltufer beanspruchte Raum das gegenüberliegende (S-) Spaltufer an keiner Stelle berühren.

So erhält man den Minimum-Raum zwischen beiden Spaltufern, also den kleinsten zulässigen Nominal-Spalt. Selbstverständlich kann aufgrund anderer Gesichtspunkte (Formgebung, Herstellung, etc.) der tatsächlich konstruierte Nominal-Spalt größer sein.

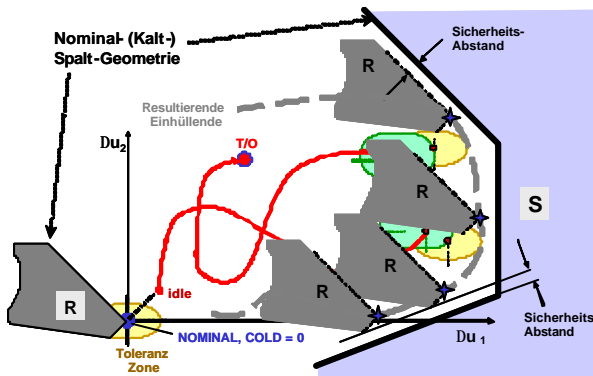


BILD 6.2: Erzeugung des S(tator)-Spaltufers aufgrund der R(otor)-Spaltufer-Relativbewegung

Auf ähnliche Weise entsteht auch der Ausriebbereich von z.B. Labyrinthspitzen in einen Einlaufbelag. Dabei sollte der Fall ohne Manöverlasten (wie beim neuen TWK nach dem pass-off Test) und der Fall des voll-eingelaufenen TWK's (bei dem alle Manöverlastkollektive wirksam waren) separat analysiert werden. Letzterer bestimmt auch die notwendige Dicke der Einlaufbeläge.

6.2.2 Analyse kritischer Betriebsspalte

Liegt die Nominal-(Kalt) Spaltgeometrie einmal fest, so können für die interessierenden oder kritischen Betriebszustände die tatsächlich auftretenden Spalte analysiert werden. BILD 6.3 zeigt dies für den Nominalspalt nach BILD 6.2 für den stationären Betriebspunkt ADP (Aero-Design Point), mit und ohne Normal-Manöverlasten und mit und ohne Toleranzbereiche.

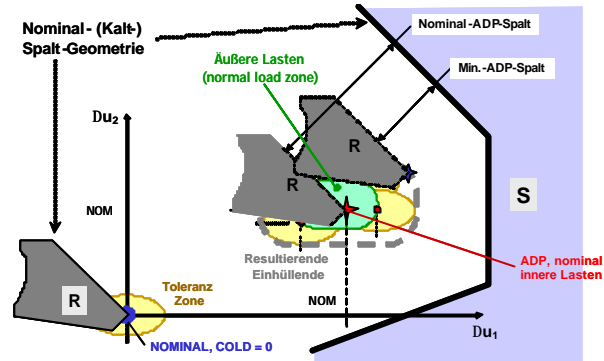


BILD 6.3: Analyse der Spaltsituation bei ADP für den nach BILD 6.1 ausgelegten Nominalspalt

Nur bei reinen Axial- oder Radial-Spalten kann jede Bewegungs-Komponente völlig separat für sich betrachtet werden.

7 AUSBLICK

Die gegenwärtigen Arbeiten zielen auf die Entwicklung eines Tools, das die vorgestellte Methode der Spaltanalyse unter einer benutzerorientierten Oberfläche für den produktiven Einsatz bereitstellt und somit eine einheitliche und durchgängige Spaltanalyse bei MTU unterstützt. Ziel dabei ist auch, die derzeit noch sehr spezielle Aufgabe der Spaltanalyse einem größeren Bearbeiterkreis zugänglich zu machen. Wesentliche Teilaufgaben dabei sind:

- Entwicklung eines FE-basierten Überlagerungs-Verfahrens, welcher kinematisch überbestimmte Kopplungen zwischen Bauteilen ermöglicht. Damit entfällt die bisher wesentliche Einschränkung, nämlich die Abstraktion der realen Geometrie in ein statisch bestimmtes Spaltmodell. Die kinematische Anbindung der einzelnen Bauteile erfolgt dabei innerhalb eines Gesamt-FE-Modells, wobei die (lokalen) Verformungen der Unterstrukturen bzw. Bauteile auch weiterhin von den originären FE-Modellen der Strukturmechanik, etc. übernommen werden.
- Einbindung eines Toleranz-Analyse-Tools, zumindest für die Berechnung der Toleranzketten innerhalb der Einzelbauteile, das eine wirkliche statistische Toleranzsummierung erlaubt.
- Integration von verbesserten Möglichkeiten zur Visualisierung der Betriebsspalt-Zustände zur Unterstützung der Interpretation der Ergebnisse.

8 SCHRIFTTUM

- [1] E. Ebert and E. Reile „Bridging the Gap between Structural and Thermal Analysis in Aircraft Design“, Technical Report AIAA-2000-4782, 8th Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, Long Beach, California, September 2000.