

# PROBABILISTISCHE UNTERSUCHUNG DES NEBENSTROMKANALS EINES TURBOFANTRIEBWERKES

C. Clemen, Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG,  
Eschenweg 11, Dahlewitz, 15827 Blankenfelde-Mahlow, Deutschland

## Einleitung

Die Probabilistik dient der Analyse von Systemen im Hinblick auf deren Sensitivität und Robustheit gegenüber Variationen der Eingabegrößen. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse können zum einen zur Bewertung des Systems in Hinblick auf seine Robustheit gegenüber Abweichungen zu den Sollwerten als auch für die Optimierung von Entwürfen genutzt werden.

Dieser Ansatz wird in dieser Arbeit auf den Bereich der Triebwerks-Installationsaerodynamik, im speziellen auf den Nebenstromkanal eines modernen Turbofantriebwerkes, ausgedehnt.

Dazu wird ein Rolls-Royce internes 1D Verfahren zur Berechnung der Nebenstromkanalverluste mit der an der TU Dresden entwickelten, probabilistischen Software Prosi [1] gekoppelt und für die Identifizierung der kritischen Einflussparameter im Bezug auf die Nebenstromkanalverluste qualifiziert. Berücksichtigt werden hierbei variable Geometrie- und Strömungsparameter, um Geometrievariationen, Fertigungsungenauigkeiten sowie Streuungen der Ein- und Austrittsrandbedingungen bei verschiedenen Triebwerksbetriebszuständen (Start, Steigflug, Reiseflug) berücksichtigen zu können. Ziel ist die Verfügbarkeit eines validierten Werkzeugs zur Bewertung und Optimierung der Strömung im Nebenstromkanal sowie der Bewertung der Kritikalität von Eingabeparametern, um bereits in der Vorauslegung des Nebenstromkanals ein verlustarmes und gegenüber Streuungen robustes Konzept zu definieren, so dass in den späteren Entwurfsschritten nur noch die detaillierte Ausformung der einzelnen Komponenten des Kanals durchgeführt werden muss.

Dazu wurden folgende Schritte durchgeführt:

- Ableitung geeigneter Eingabeparameter für die relevanten Geometrie- und Strömungsgrößen sowie die Bestimmung realistischer Streuungsbereiche
- Definition der Prozesskette
- Analyse der Zusammenhänge zwischen den einzelnen Eingangsgrößen bzw. deren Streuung und den resultierenden Verlusten im Bypasskanal unter Nutzung von Robustheits- und Sensitivitätsanalysen
- Erweiterung des Systems für eine probabilistische Optimierung
- Abschließende Plausibilitätsprüfung der abgeleiteten Einflüsse mit Hilfe von CFD Rechnungen ausgewählter Testfälle

Das vorliegende Paper zeigt Details zu den durchgeführten Schritten und dokumentiert die Anwendbarkeit von Prosi für die gewählte Aufgabenstellung sowie einige konkrete Erkenntnisse der durchgeführten Studie.

## Grundlagen und Prozess

Der Nebenstromkanal leitet die vom Fan verdichtete und beschleunigte Luft zur Düse. Aufgrund seiner Anordnung über dem Triebwerkskern, muss der Nebenstromkanal neben dieser Funktion zahlreiche Komponenten aufnehmen, die zum einen strukturelle Aufgaben erfüllen, wie zum Beispiel Streben, Triebwerksaufhängungen, A-Frames, und zum anderen akustische und aerodynamische Aufgaben zur Verbesserung der Gesamttriebwerksleistung übernehmen, wie zum Beispiel Schallabsorber, Zapfluftauslässe, Kühler, usw..

Alle Komponenten lassen sich durch geometrische Parameter beschreiben, welche Streuungen bedingt durch Fertigungstoleranzen aufweisen. Da die Anzahl der Parameter sehr groß ist (ca. 50) und die Interaktion der einzelnen Komponenten und Parameter nicht bekannt ist, lassen sich keine einfachen Rückschlüsse auf ihre Wichtigkeit in Bezug auf die Druckverluste im Nebenstromkanal ziehen. Die Verluste entstehen primär durch Reibung und die Verdrängungswirkung der einzelnen Komponenten und der damit einhergehenden lokalen Erhöhung der Machzahl. Diese Verluste können in der Vorauslegung mit einem 1D Verlustberechnungsverfahren bestimmt werden, dem sogenannten Rolls-Royce Bypassduct-Tool. Verluste durch Sekundärströmungen und Ablösungen werden in der Detailauslegung mit 2D- bzw. 3D-CFD bewertet.

Die Kenntnis des Einflusses der einzelnen Parameter auf die Nebenstromkanalverluste, die Robustheit der Verluste gegenüber einzelnen Schwankungen in der Geometrie sowie gegenüber Variationen der Eintrittsströmungsgrößen sind von größtem Interesse in Hinblick auf ein optimales aerodynamisches Design als auch in Hinblick auf kostenoptimiertes Design (Festlegung von Toleranzbändern).

Um diese Einflüsse zu bestimmen ist die Probabilistik das geeignete Mittel. Dazu müssen die Streuungen der Bauteilparameter bekannt sein, in diesem Fall sind die Toleranzen bekannt, jedoch keine Streuungen in Form von Messwerten aus der Fertigung, daher werden gleichverteilte Streuungen innerhalb der Toleranzen angenommen. Die insgesamt 48 Parameter werden mit diesen Streuungen zufällig beaufschlagt und zufällige Kombinationen der Parameter ergeben Realisierungen von Nebenstromkanalgeometrien (genannt Fertigung 1 – N), siehe Bild 1. Diese Realisierungen werden mit dem Probabilistik Tool ProSi erzeugt. Mit dem Rolls-Royce Bypassduct-Tool werden die jeweiligen Druckverluste  $DP = P_{total, \text{Eintritt}} - P_{total, \text{Austritt}}$  bzw.  $DP/P_{total, \text{Eintritt}}$  und  $DP/(P_{total, \text{Eintritt}} - P_{statisch, \text{Eintritt}})$  bestimmt werden, diese werden als Ergebnis an ProSi zurückgegeben und können dann probabilistisch ausgewertet werden.

Bild 1 zeigt diesen Ablauf, Bild 2 die allgemeine Anbindung von ProSi und dem Bypassduct-Tool, die mit Hilfe einer Matlab Schnittstelle realisiert wurde.

Die probabilistische Analyse wurde mit 500 Realisierungen mit direkter Monte-Carlo-Simulation und Latin-Hypercube-Sampling durchgeführt .

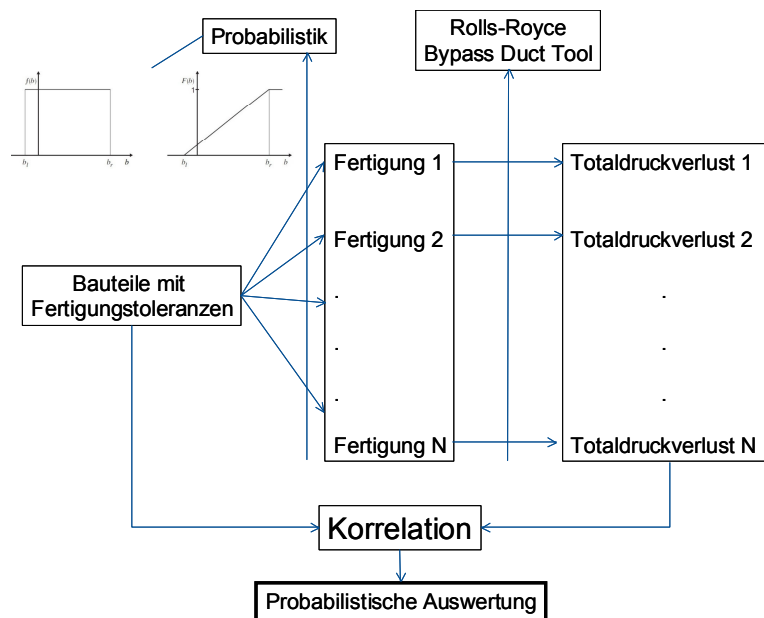


Bild 1: Prozessablauf für die probabilistische Analyse

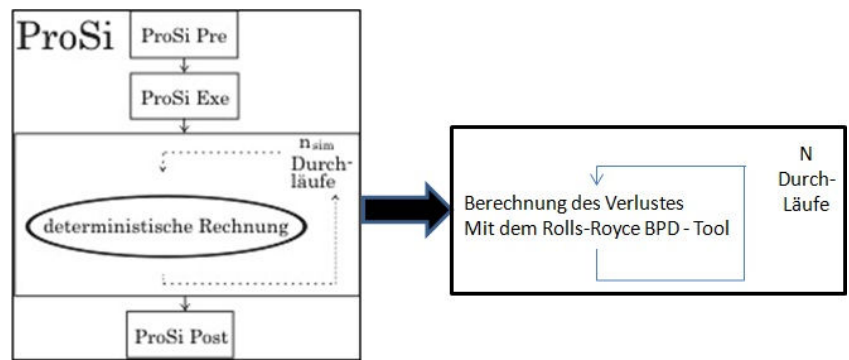


Bild 2: Kopplung von ProSi und dem RR BPD Tool

### Definition der Parameter

Die erste Komponente im Nebenstromkanal stromab des Fan-Nachleitrades sind Streben (Struts), die für die strukturelle Verbindung des Triebwerkskerns mit dem Nebenstromkanal sorgen. Sie sind aerodynamisch geformt, wie in Bild 3 gezeigt, um einen geringen Strömungswiderstand zu erreichen. Als Parameter wird die Länge von der Vorderkante bis zur Hinterkante definiert, abzüglich einer Cut-off Länge  $\Delta c$ , die die Definition einer stumpfen Hinterkante ermöglicht. Daraus ergibt sich dann die echte Sehnenlänge. Als weitere Parameter werden die axiale Position im Kanal, die Profildicke sowie der Neigungswinkel der Vorderkante zur Strömung (Pfeilungswinkel  $\alpha$ ) genutzt.

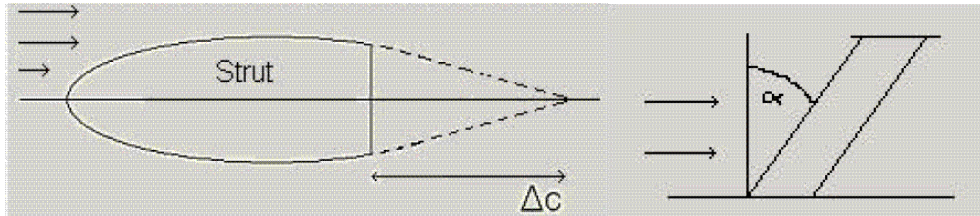


Bild 3: Definition einer Strebe (Strut)

Stromab der Streben befinden sich sogenannte Bifurkationen oder Splitter Fairings. Diese Bauteile dienen der Verkleidung von Leitungen und der Triebwerksaufhängung. Sie haben eine symmetrische Profilkontur und sind somit vergleichbar mit den Streben. Parameter sind auch hier die Länge, Cut-off Länge, Dicke, Position und der Pfeilungswinkel.

Ein weiteres strukturelles Bauteil im Nebenstromkanal sind die sogenannten A-Frames stromab der Splitter Fairings. Der Name ergibt sich aus der Form der Stirnfläche. Betrachtet man einen Ringquerschnitt, erscheint dieses Bauteil in Form eines „A“, siehe Bild 4. Es werden als Variablen wieder die Länge, Cut-off Länge, Position und die Dicke definiert. Darüber hinaus der Winkel zwischen einem A-Frame-Paar  $\chi$ .

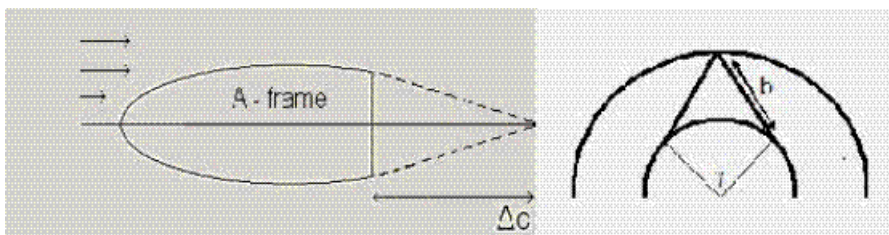


Bild 4: Definition A-Frame

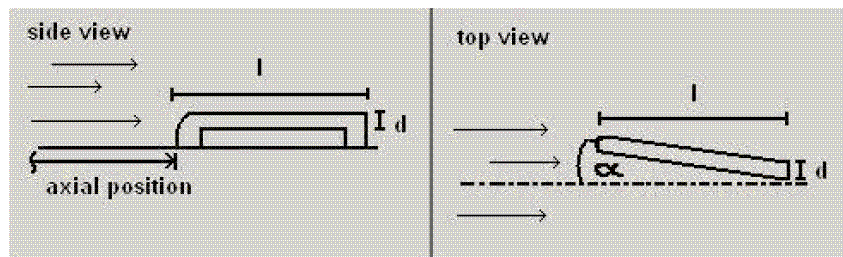


Bild 5: Definition Fuel Shut Off Cable

Weitere Komponenten im Nebenstromkanal sind:

- Das „Fuel Shut Off Cable“ (Kraftstoff-Unterbrechungs-Kabel) dient der Unterbrechung der Kraftstoffzufuhr im Falle eines Wellenbruchs. Es wird von einer Zwischenwelle nach außen in den Nebenstromkanal und von dort zum Kraftstoffventil geführt. Im Nebenstromkanal ist es durch ein Rohr vor Beschädigungen geschützt. In Bild 5 sind die Geometrieparameter gezeigt. Diese sind die Länge  $l$ , der Durchmesser  $d$ , der Winkel  $\alpha$  und die axiale Position.

- Um Unebenheiten der Kanalwand zu beschreiben, werden „Bulges“ (Beulen) definiert. Sie werden als blasenähnliche Strömungshindernisse verstanden und über ihre Höhe, Position und ihren Durchmesser beschrieben, siehe Bild 6.
- Zur Sicherstellung der Verdichterstabilität werden Handling Bleed Valves (Abblasventile) verwendet. Für die probabilistische Rechnung werden die axiale Position, der Durchmesser, die Höhe und die Öffnungsfläche einbezogen, siehe Bild 7.
- Des weiteren gibt es sogenannte Scoops, um z. B. Kühlluft für die Turbine aus dem Nebenstromkanal zu entnehmen. Dies sind anschaulich entgegen der Strömungsrichtung geöffnete Rohre, daher ist für den Druckverlust die Öffnungsfläche maßgeblich. Hinzu kommen noch die axiale Position und die Formvarianten, siehe Bild 8.
- Die Strömung im Nebenstromkanal wird ebenfalls zur Kühlung des Ölsystems genutzt. Die Schnittstelle bilden Oberflächenkühler, die im Nebenstromkanal hängend angeordnet sind. Vereinfacht werden diese als Plattenkühler mit einer Breite, Länge, Position und Dicke angenommen, Bild 9.
- Eine weitere Komponente sind akustische Absorberflächen angebracht an den Nebenstromkanalwänden, um die Lärmemissionen zu minimieren. Diese funktionieren prinzipiell wie Helmholtzresonatoren, praktisch ist dies ein Hohlraum hinter einer porösen Wand. Wenn Schallwellen auf diese Hohlräume treffen, so regt die damit einhergehende Druckschwankung die Luft im Hohlraum zum Schwingen an. Diese Schwingung wird durch die Viskosität der Luft gedämpft, wodurch auch die Schallwellen gedämpft werden. Die Absorber beginnen an einer bestimmten axialen Position und erstrecken sich dann über eine definierte Länge.

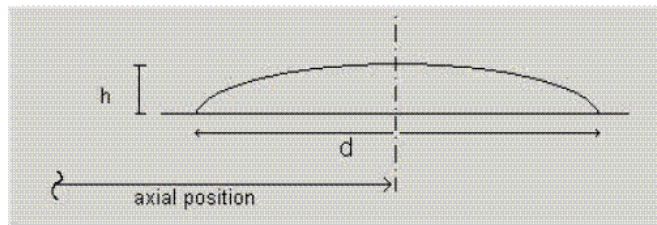


Bild 6: Definition Bulge

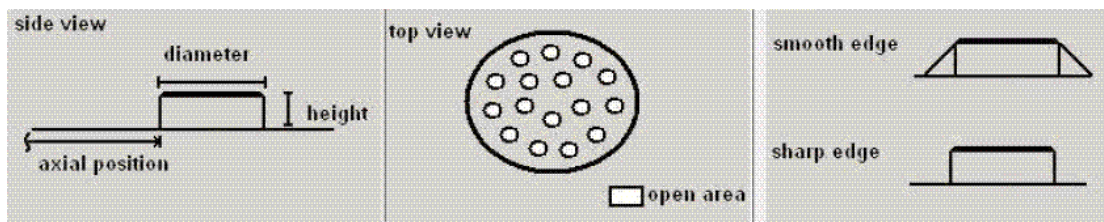


Bild 7: Definition Handling Bleed Valve

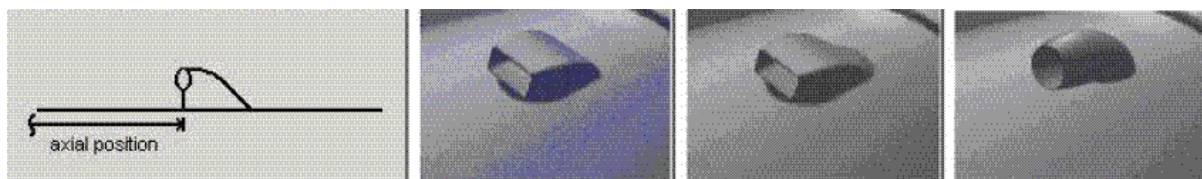


Bild 8: Definition Scoop

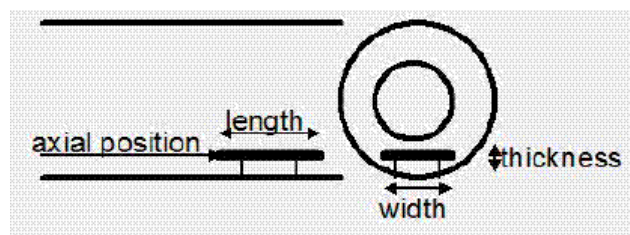


Bild 9: Definition Surface Cooler

In einer separaten Untersuchung wurde außerdem die Geometrie des Nebenstromkanals selbst innerhalb ihrer Fertigungstoleranzen variiert, dazu wurde der Nebenstromkanal in 10 Bereiche (Parameter) unterteilt in denen die jeweilige Streuung aufgeprägt wird, siehe Bild 10.

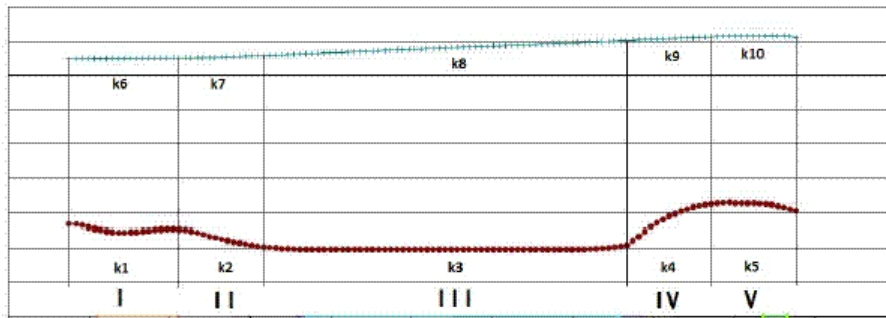


Bild 10: Definition Nebenstromkanal

Für jeden Parameter werden basierend auf den zugelassenen Fertigungstoleranzen die Variationen in Form von Gleichverteilungen vorgegeben. In Ermangelung der tatsächlichen Streuungen in der Fertigung in Form einer Datenbank.

### Ergebnisse der probabilistischen Untersuchung

#### Variation der Geometrieparameter beim Flugzustand „Cruise“

Bild 11 zeigt die Korrelationsmatrix der Variation der Geometrieparameter beim Flugzustand „Cruise“ bezogen auf die drei Druckverlustwerte DP, DP/P und DP/D. Es zeigt sich, dass die meisten Parameter nur schwach korreliert sind und einige wenige eine große Korrelation aufweisen.

Deutlicher wird die Wichtigkeit der einzelnen Parameter in der Darstellung im Kuchendiagramm für DP (Bild 12): Die Dicke der A-Frames (pFrame\_thi) hat den größten Einfluss auf den Druckverlust bei diesem Flugzustand. Unwesentlich kleiner ist der Einfluss der Eintrittsfläche des zweiten Scoops (pScoo2\_a). In der Größe nachfolgend sind die Dicke des oberen Splitter Fairings (pUS\_thi), die Dicke des ersten Struts (pStr1\_thi) und die Höhe des zweiten Handling Bleed Valves (pHBV2\_h) zu nennen. Zusammen machen diese fünf Geometrieparameter über 50% des Kuchendiagramms aus. Unerwartet ist, dass die Streuungen der Länge der symmetrisch profilierten Bauteile wie den Struts, der A-Frames und der Splitter Fairings, anscheinend keinen, oder nur sehr geringen Einfluss auf die Veränderungen des Druckverlustes haben. Darüber hinaus wurde untersucht, ob sich an diesen Korrelationen eine Änderung erkennen lässt, wenn der Totaldruckverlust auf den Totaldruck am Eintritt P bzw. den dynamischen Druck D bezogen wird. Es ist im Vergleich zu DP kein gravierender Unterschied zu erkennen. Vor allem in den Top 5 Variablen ist der Wert der berechneten Korrelation nahezu identisch geblieben. Einzig die Rangfolge der restlichen Parameter hat sich geändert. Da die Korrelationen jedoch so gering sind, ist dies nicht relevant.

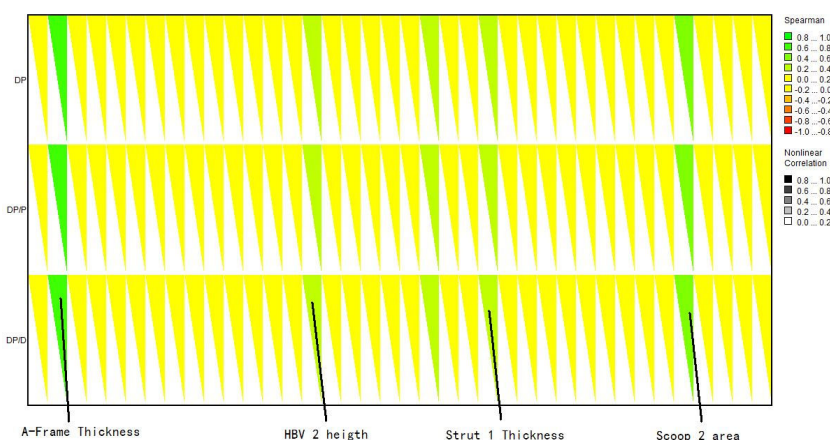


Bild 11: Korrelationsmatrix bei Variation der Geometrieparameter beim Flugzustand „Cruise“

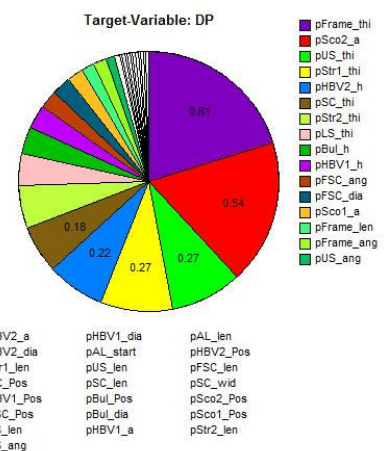


Bild 12: Kuchendiagramm bei Variation der Geometrieparameter beim Flugzustand „Cruise“



Bei Untersuchung der Flugzustände Max Take-off und Max Climb zeigt sich, dass die Top 5 Parameter identisch bleiben, lediglich die Reihenfolge und Gewichtung ist marginal unterschiedlich.

Optimierung der Toleranzen der Geometrieparameter

Basierend auf den zuvor gezeigten Ergebnissen, dass 5 von 48 Parametern mehr als 50% der Streuungen des Druckverlustes ausmachen, ist es naheliegend über eine Optimierung der Toleranzen der Geometrieparameter nachzudenken. Da zu diesem Zeitpunkt noch keine Informationen zu den tatsächlichen Fertigungszeiten und –kosten vorliegen und daher keine systematische Optimierung vorgenommen werden kann, werden in einem ersten Schritt folgende Annahmen getroffen: 1) Verringerung der Toleranzmaße der Top 5 Einflussparameter um 50% und 2) Verdoppelung der Toleranzen aller anderen Parameter.

Mit dieser Annahme ergibt sich eine komplett neue Liste der Haupteinflussfaktoren (Bild 13). Die Dicke der A-Frames befindet sich jetzt auf dem vierten Platz, während die Dicken des ersten Struts, des oberen Splitter Fairings und des zweiten Struts nun die Top drei Parameter ausmachen. Die Öffnungsfläche des zweiten Scoops ist auf Platz acht gerutscht. Diese Umverteilung der Einflüsse lässt darauf schließen, dass die Toleranzmaße ein entscheidender Faktor bei der Bestimmung der Einflussgrößen sind. Die Änderungen bezüglich der Druckverlustschwankung wurden ebenfalls berechnet. Während beim Referenzfall eine relative Schwankung von +1.01% bis -1.58% zu beobachten ist, verändert sich diese Streuung auf +1.68% bis -0.954% und führt damit auch zu einem erhöhten mittleren Druckverlust. Eine Vergrößerung der Streuungen bzw. des mittleren Druckverlustes verglichen mit dem Referenzfall ist jedoch nicht erwünscht, daher werden in einer zweiten Untersuchung die Toleranzmaße der anderen Bauteilparameter anstatt verdoppelt nur um 30% vergrößert. Dies ergibt dann eine relative Schwankung des Druckverlustes DP von +1.14% bis -1.25%. Diese Werte liegen in der gleichen Größenordnung wie der Referenzfall. Diese Untersuchung ist ein guter Ausgangspunkt für eine vertiefte probabilistische Optimierung der Fertigungstoleranzen der Nebenstromkanalkomponenten und offeriert das Potential für Kostensenkungen im Fertigungsprozess.

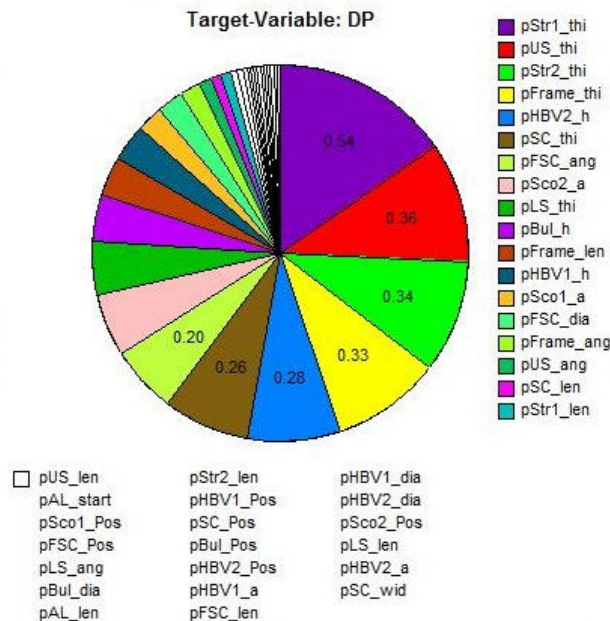


Bild 13: Kuchendiagramm für die Optimierung der Toleranzen der Geometrieparameter

Variation der Strömungseintrittsgrößen beim Flugzustand „Cruise“

Um zu untersuchen, welchen Einfluss eine Streuung der Strömungsgrößen am Nebenstromkanaleintritt hat, werden alle Geometrieparameter konstant auf ihrem Nominalwert gehalten. Die angenommenen Streuungen der Drei Eintrittsparameter Massenstrom, Totaldruck und Totaltemperatur sind ±1.5%, ±1.5% bzw. ±0.5%.

Bei Betrachtung der Korrelationsmatrix in Bild 14 zeigt sich deutlich, dass anders als bei den vorangegangenen Untersuchungen sich die Korrelationen für den jeweiligen Verlustparameter ändern. Besonders eindeutig ist, dass die Haupteinflussgröße bei DP und DP/P der Massenstrom ist, während sich

für DP/D der Druck bestimmend ist. Der Grund hierfür ist, dass bei DP/D der Verlust auf den Massenstrom über den dynamischen Druck bezogen ist. Dies führt zu unterschiedlicher Korrelation und unterschiedlicher Gewichtung. Dennoch sind stets Druck und Massenstrom die bestimmenden Parameter.

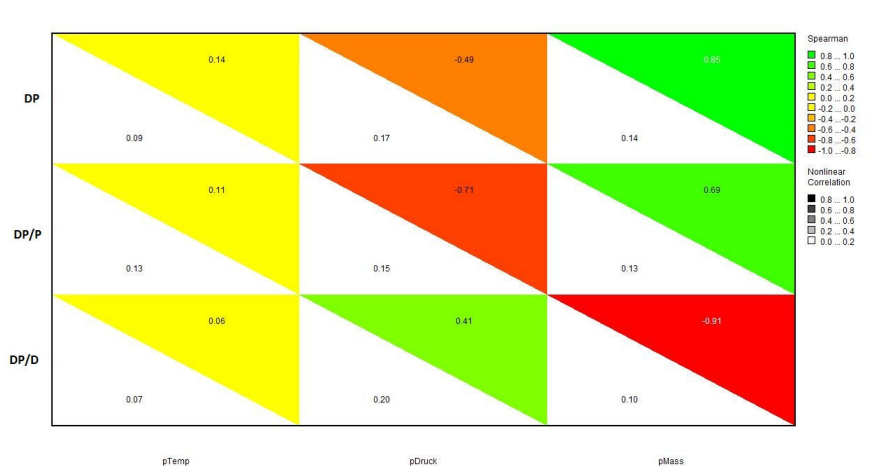


Bild 14: Korrelationsmatrix für die Variation der Strömungseintrittsrößen beim Flugzustand „Cruise“

### Variation der Kanalgeometrie beim Flugzustand „Cruise“

Es ist bekannt, dass grundsätzlich eine Erweiterung des Kanalquerschnitts eine Absenkung der Machzahlen bedingt und dadurch die Verluste tendenziell sinken sollten, und umgekehrt. Um den vorliegenden Nebenstromkanal, siehe Bild 10, zu untersuchen, werden an innerer und äußerer Wand jeweils 5 Bereiche (Parameter) definiert ( $k_1, k_2, \dots, k_{10}$ ) auf denen eine gleichverteilte Streuung innerhalb Fertigungstoleranz aufgebracht wird. Die Korrelationsmatrix in Bild 15 zeigt, dass die Korrelationskoeffizienten sehr gering ausfallen.



Bild 15: Korrelationsmatrix bei Variation der Kanalgeometrie beim Flugzustand „Cruise“

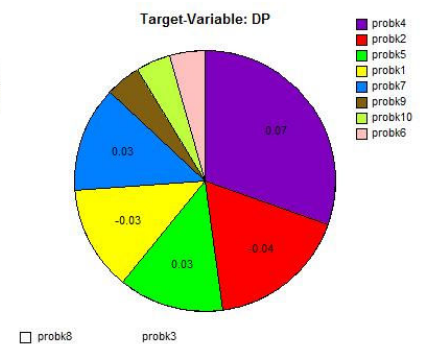


Bild 16: Kuchendiagramm bei Variation der Kanalgeometrie beim Flugzustand „Cruise“

Um überhaupt eine Bewertung vornehmen zu können, wird das Kuchendiagramm (Bild 16) herangezogen. Mehrere Phänomene werden bei genauerer Betrachtung ersichtlich. Die Variablen zur Verschiebung der unteren Wandkonturlinie haben allgemein einen stärkeren Einfluss als die Parameter der äußeren Linie. Dies ist so zu erklären, dass die äußere Linie nahezu eine Gerade ist, während die innere Linie gewölbt ist und daher ihre Form einen Einfluss auf die Strömung ausübt. Dies ist auch daran zu erkennen, dass der gerade Teil der inneren Linie  $k_3$  nicht unter den ersten 8 Parametern zu finden ist. Die Haupteinflussparameter sind  $k_4$  und  $k_2$ . Dabei zeigt  $k_4$  eine positive und  $k_2$  eine negative Korrelation. Das bedeutet, dass mit einer Vergrößerung von  $k_4$  und einer Verkleinerung von  $k_2$  der Druckverlust abnimmt. Was jedoch deutlich wird, ist, dass die Koeffizienten so gering sind, dass das Ergebnis ist, dass der Nebenstromkanal sehr resistent gegenüber Wandkonturänderungen in der Größenordnung der Fertigungstoleranzen ist. Das wird auch an den Druckverlustschwankungen ersichtlich: Es wurde eine relative DP Schwankung von +0,86% bis -0,29%

berechnet, was eine vernachlässigbare Absolutstreuung des normierten Druckverlustes DP/P -0.0044% bis +0.013% bedeutet.

### Grundlagen für die Optimierung der Kanalgeometrie beim Flugzustand „Cruise“

Nachdem in der ersten Analyse die Ringkanalhöhe innerhalb der gegebenen Fertigungstoleranz verändert wurde und die kritischen Bereiche herausgestellt werden konnten, soll nun eine Variation in größeren Bereichen durchgeführt werden. Es gelten die gleichen probabilistischen Variablen und Strömungsbedingungen. Jedoch wird der Streuungsbereich nun auf  $\pm 5\text{mm}$  erweitert. Bild 17 zeigt die Korrelationsmatrix. Verglichen mit Bild 15 haben sich die Korrelationskoeffizienten deutlich verändert, ebenso das Kuchendiagramm (Bild 18). Hier sind nun  $k_7$  und  $k_2$  die Haupteinflussparameter für den Druckverlust. Im Gegensatz zur Rechnung innerhalb der Toleranzmaße ergeben sich jedoch keine Trennungen in obere und untere Wandkonturlinie. Es ist eher so, dass nun die engsten Querschnitte entscheidend für den Druckverlust sind. Die Variablen  $k_7$  und  $k_2$  steuern gerade diesen engsten Querschnitt. Anhand der positiven Korrelation von  $k_2$  und der negativen Korrelation von  $k_7$  ist zu erkennen, dass der Druckverlust mit engerem Querschnitt ( $k_7$  kleiner und  $k_2$  größer) zunimmt. Das bedeutet für eine Optimierung, dass in erster Linie der Bereich II zu betrachten ist, da hier der größte Einfluss auf den Druckverlust zu beobachten ist. Die Druckverlustschwankung für diese Rechnung liegt, ähnlich wie die Korrelationskoeffizienten, ebenfalls sehr viel höher als in der vorangegangenen Rechnung. Für die relative Schwankung des DP Wertes um den Auslegungswert ergibt sich ein Bereich von +9.607% bis -7.03% und für den normierten Druckverlust DP/P ergibt sich eine absolute Abweichung vom Designverlust zwischen +0.1439% und -0.1053%. Diese Absolutänderung bedeutet einen Änderungsbereich für den spezifischen Treibstoffverbrauch von ungefähr +0.1% bis -0.08%. Dies ist signifikant und macht daher eine Optimierung sinnvoll.

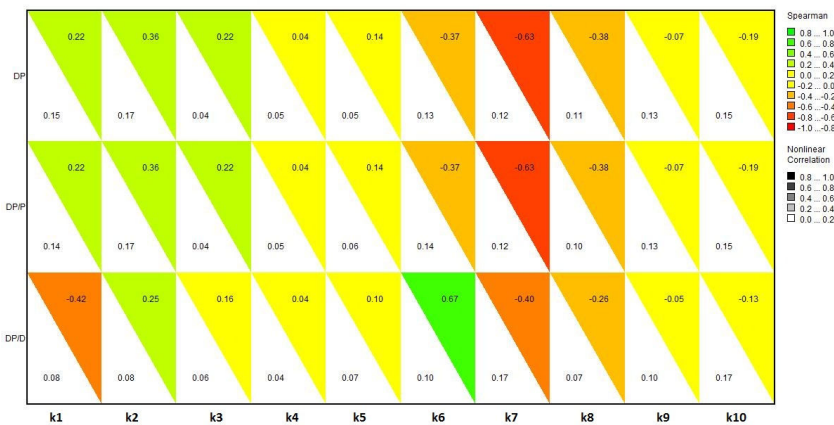


Bild 17: Korrelationsmatrix bei der Optimierung der Kanalgeometrie beim Flugzustand „Cruise“

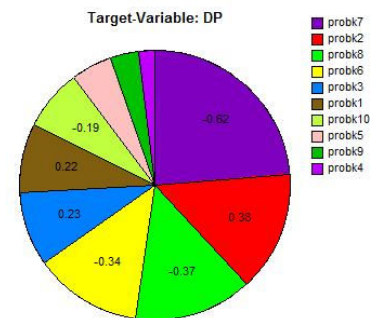


Bild 18: Kuchendiagramm bei der Optimierung der Kanalgeometrie beim Flugzustand „Cruise“

### Plausibilitätsprüfung mit CFD

Um zu prüfen ob die Ergebnisse der probabilistischen Analyse mit Prosi und dem Rolls-Royce Bypassduct-Tool qualitativ die richtigen Trends vorhersagen und damit der beschriebene Prozess zukünftig für die vorgestellten Zwecke der Kanaloptimierung bzw. der Toleranzoptimierung genutzt werden kann, wurden drei ausgewählte Kanalgeometrien mit 3D-CFD (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) nachgerechnet. Dabei wurde sich als Vereinfachung auf Variationen in der Kanalgeometrie beschränkt und auf die Komponenten verzichtet.

Es wurden folgende Geometrien gerechnet: Der nominale Nebenstromkanal, die Realisierung aus der Untersuchung mit variabler Kanalgeometrie innerhalb der Fertigungstoleranzen mit dem niedrigsten und die Realisierung mit höchstem Druckverlust.

Die CFD Analyse wurde mit dem Rolls-Royce Hydra CFD Code durchgeführt unter Nutzung des Spallart-Almaras Turbulenzmodells, die Kanalgeometrien wurden strukturiert mit dem Rolls-Royce Vernetzungstool PADRAM vernetzt.

Als Randbedingungen wurden am Eintritt der Totaldruck und die Totaltemperatur des „Cruise“ Flugzustandes gesetzt, der Gegendruck am Austritt wurde so gewählt, dass der Kanal mit dem richtigen Massenstrom durchströmt wird.



Bild 19 zeigt beispielhaft die normierte statische Druckverteilung im Kanal mit Nominalgeometrie.

Grundsätzlich ergibt die CFD für alle drei Fälle stets einen um 21% höheren Druckverlust als das Bypassduct-Tool. Grund hierfür ist, dass in der CFD keine ausgebildete Grenzschicht am Kanaleintritt angenommen wurde und im Bypassduct-Tool mit einer voll ausgebildeten Rohrströmung gerechnet wird. Außerdem kann das Bypassduct-Tool lediglich reine Reibungsverluste bestimmen und nicht das Grenzschichtverhalten an Stellen großer Gradienten bzw. starker Wölbung der Kontur. Betrachtet man jedoch die Variation des Druckverlusts zwischen den einzelnen Varianten, so sagt die CFD die gleichen Differenzen vorher wie das Bypassduct-Tool. Das bedeutet, dass die qualitativen Aussagen korrekt sind und daher das gewählte Tool und der Prozess ein valides Mittel zur Nutzung für probabilistischen Analysen des Nebenstromkanals sind.

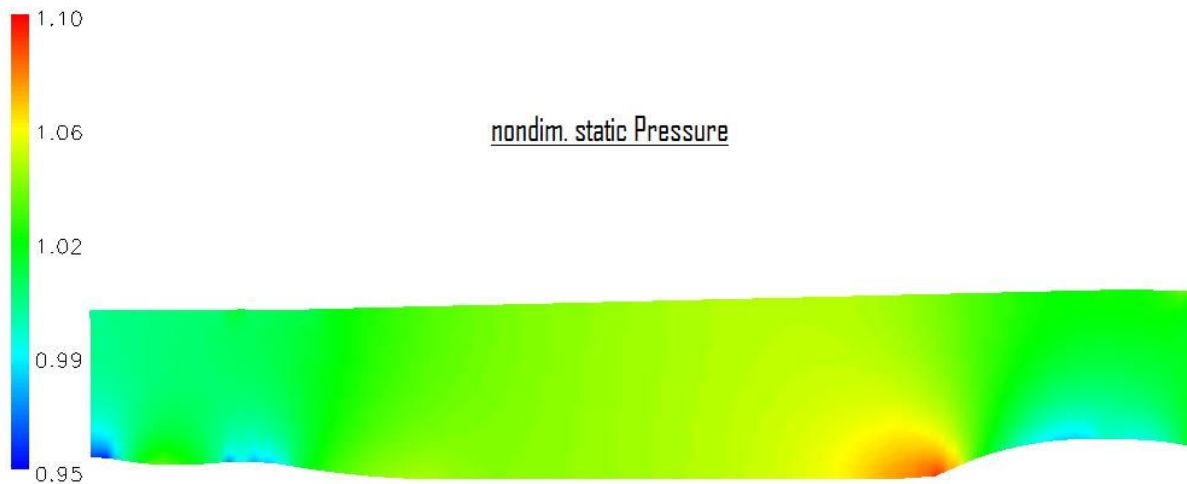


Bild 19: Normierter statischer Druck im Kanal mit Nominalgeometrie bei „Cruise“ Flugbedingung

### Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein Prozess vorgestellt, der nicht nur den Totaldruckverlust im Nebenstromkanal eines Triebwerks berechnet, sondern auch die Abhängigkeiten gegenüber Variationen der Bauteilgeometrien und Strömungsrandbedingungen darstellt. Dazu wurde ein 1D Berechnungsverfahren für den Nebenstromkanal (Rolls-Royce Bypassduct-Tool) mit dem Probabilistik Tool Prosi der TU Dresden verknüpft.

Durch die Verbindung dieser beiden Programme wurde die Möglichkeit geschaffen, ein ausgelegtes System oder Modell hinsichtlich seiner Robustheit gegenüber Streuungen in den Randbedingungen und Geometrie Größen zu untersuchen. Diese Untersuchungen zeigten, wie stark sich der Druckverlust ändert, wenn es zum Beispiel durch fertigungsbedingte Ungenauigkeiten zu Geometrie veränderungen kommt. Die probabilistischen Ergebnisse zeigten, dass die untersuchte Kanalgeometrie sehr robust gegenüber Bauteilvariationen innerhalb der gegebenen Toleranz ist. Erst bei großen Abweichungen von der Nominalgeometrie zeigen sich starke Druckverlustschwankungen. Außerdem wurde gezeigt welche Parameter der verschiedenen Komponenten im Nebenstromkanal den größten Einfluss auf den Druckverlust haben. Damit wird klar bei welchen Parametern eine Verringerung oder Erweiterung des Toleranzbandes sinnvoll sein kann.

Basierend auf diesen Ergebnissen wurden erste Ansätze zu einer Optimierung von Geometrie bzw. Fertigungstoleranzen vorgestellt. So konnte mit der Verringerung der Toleranzen der Top 5 Parameter um 50% nicht nur eine Reduzierung der relativen Druckverlustschwankung von nahezu 50% erreicht werden, sondern es ergab sich die Möglichkeit, die Toleranzen der anderen Bauteilgrößen um bis zu 30% anzuheben. Dabei blieb der Schwankungsbereich mindestens auf dem Niveau der Referenzgeometrien mit Nominaltoleranzen.

Die Ergebnisse der ausgewählten Optimierungsansätze zeigen nicht nur Möglichkeiten zur kostengünstigeren Fertigung des Nebenstromkanals und seiner Komponenten auf, sondern können auch zu einer Effizienzsteigerung des Triebwerkes genutzt werden.

Um die Ergebnisse der Probabilistik auf deren Plausibilität zu überprüfen, wurden im letzten Schritt numerische Strömungssimulationen mit Hilfe von CFD durchgeführt.

Es konnte gezeigt werden, dass die probabilistischen Analysen mit Hilfe des RR Bypassduct-Tools in der Lage sind, die qualitativ richtigen Aussagen zu liefern und daher das geeignete Mittel für die vorgestellten Untersuchungen sind.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das entwickelte System ein sehr gutes Werkzeug zur Robustheits- und Sensitivitätsanalyse darstellt. Mit der Koppelung des BPD-Tools mit Prosi ist ein nützliches Werkzeug zur Abschätzung möglicher Optimierungen des Druckverlustes und zur Sensitivitätsanalyse geschaffen worden. Die vorgestellte Arbeit ist die Grundlage dafür die Probabilistik im Bereich der Installationsaerodynamik zu etablieren und neben dem Nebenstromkanal auch für andere Bauteile zu verwenden.

### **Danksagung**

Der Autor dankt dem Management von Rolls-Royce Deutschland dafür die vorliegende Arbeit veröffentlichen zu können. Besonderer Dank gilt Tony Brüssow, der die vorliegenden Rechnungen im Rahmen seiner Diplomarbeit bei Rolls-Royce Deutschland angefertigt hat.

### **Literatur**

[1] Voigt M., Bischoff T.: Prosi Manual, 2. Version, Technische Universität Dresden, 2007