



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelor-Thesis

Studiendepartment Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

**Untersuchung des Einflusses unrunder Verdichtergehäuse
auf das Betriebsverhalten von Flug-Triebwerken**

Verfasser: Arben Emsija

Abgabedatum: 28.02.2012

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Department Fahrzeugtechnik + Flugzeugbau
Berliner Tor 9
20099 Hamburg

in Zusammenarbeit mit:

Lufthansa Technik AG
Dept. HAM WP 311
Weg beim Jäger 193
22335 Hamburg

Telefon: +49 40 5070 63632
E-Mail: Joern.Kraft@lht.dlh.de

Verfasser: Arben Emsija
Matr.-Nr.: 1931089

Abgabedatum: 28.02.2012

1. Prüfer: Prof. Dr. Willy J. G. Bräunling
2. Prüfer: Dipl.-Ing. Jörn Kraft

Industrieller Betreuer: Dipl.-Ing. Jörn Kraft

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Stellen, die wörtlich oder annähernd wörtlich aus Veröffentlichungen genommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht. Die Versicherung bezieht sich auch auf in der Arbeit gelieferte Zeichnungen, Skizzen, bildliche Darstellungen und dergleichen.

Hamburg, den 28.02.2012

Arben Emsija

Hintergrund

Hochdruckverdichter von Flug-Triebwerken haben einen wesentlichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Gesamttriebwerkes und sind darüber hinaus hoch belastet. Ein kritischer Aspekt für den effizienten Betrieb ist dabei der Rotorspalt zwischen Laufschaukel und Gehäuse. Aus diesem Grund wird während der Instandhaltung seit langem ein wesentliches Augenmerk auf die genaue Einstellung des Rotorspaltes gerichtet. Ein Aspekt, der in der Vergangenheit jedoch weit weniger beachtet wurde, ist die Unrunde des Gehäuses. Einerseits nimmt diese mit dem Alter der Motoren zu, durch Anlaufen der Schaufeln oder manueller Nacharbeit während der Überholung, andererseits sind die zulässigen Toleranzen für die Rundheit im Verhältnis zum zulässigen Rotorspalt groß. Aus diesem Grund soll im Rahmen dieser Arbeit der Einfluss der Gehäuserundheit (Hochdruckverdichter) auf den Verdichter und die daraus resultierende Wechselwirkung mit dem Gesamtsystem Motor untersucht werden. Die Arbeit wird anhand von Messdaten des Motortyps CFM56-5C durchgeführt.

Aufgabenstellung

Anhand einer Reihe von Messdaten realer Motoren sollen die folgenden einzelnen Aspekte untersucht werden.

- Literaturrecherche
- Gegenüberstellung der Rundheit und der gemessenen Verdichterwirkungsgrade
- Gegenüberstellung der Rundheit des Gehäuses und der Rotor-Exzentrizität beim Einbau mit der Streuung der Verdichteraustrittstemperatur
- Untersuchung des Effekts abweichender Messwerte der von der Engine Control Unit (ECU) verwendeten Messdaten auf das Steuerungssystem des Motors (Aktive Rotorspalt Regelung der Hochdruckturbine)
- Vergleich der Eingangparameter der Regelung mit dem Temperaturprofil am Turbinenaustritt

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Inhaltsverzeichnis | a |
| Nomenklatur | c |
| 1 Einleitung..... | 1 |
| 2 Grundlagen | 2 |
| 2.1 CFM56-5C4..... | 2 |
| 2.2 Aufbau des Triebwerks..... | 4 |
| 2.3 Der axiale Hochdruckverdichter..... | 5 |
| 2.4 Die axiale Hochdruckturbine..... | 8 |
| 2.5 Tipspalt | 10 |
| 2.6 Strömungsverluste | 11 |
| 2.7 Thermodynamische Zustandsgrößen..... | 14 |
| 2.8 Verdichterwirkungsgrad | 15 |
| 2.9 Aktive Spaltkontrolle der Hochdruckturbine | 16 |
| 2.10 Koordinatensystem | 18 |
| 3 Messinstrumentierung | 19 |
| 3.1 Prüfstand..... | 19 |
| 3.2 Messdaten | 20 |
| 3.3 T55-Messung..... | 22 |
| 3.4 HSG-Spalt..... | 24 |
| 3.5 Strömungsversatz im Hochdruckverdichter | 25 |
| 3.6 Rundheit des HDV-Gehäuses..... | 30 |
| 3.7 Rotor-Exzentrizität der N2-Welle | 34 |
| 3.8 Streuung der Verdichteraustrittstemperatur..... | 37 |
| 3.9 Ventilkappenstellung der HPTACC..... | 38 |
| 4 Auswertung..... | 41 |
| 4.1 Rundheit mit Verdichterwirkungsgrad | 41 |
| 4.2 Rundheit und Rotor-Exzentrizität mit der T3-Streuung..... | 45 |
| 4.2.1 Streuung der Verdichteraustrittstemperatur..... | 45 |
| 4.2.2 Rundheit des HDV-Gehäuses..... | 46 |
| 4.2.3 Rotor-Exzentrizität der Hochdruckwelle..... | 53 |
| 4.3 Steuerungssystem der aktiven Rotorspalt-Regelung der Hochdruckturbine..... | 55 |

| | | |
|-----|--|----|
| 4.4 | Eingangsparameter der Regelung mit dem Temperaturprofil am Turbinenausstritt | 60 |
| 5 | Zusammenfassung | 64 |
| | Abbildungsverzeichnis | 68 |
| | Diagrammverzeichnis | 70 |
| | Tabellenverzeichnis | 71 |
| | Formelverzeichnis | 72 |
| | Literaturverzeichnis | 73 |

Nomenklatur

| Abkürzung | Bedeutung |
|------------------|---|
| ALF | Blickrichtung von hinten nach vorne (Aft Looking Forward) |
| CFD | Numerische Strömungsmechanik (Computational Fluid Dynamics) |
| ECU | Elektronisches Steuergerät für die Triebwerksregelung (Electronic Control Unit) |
| FLA | Blickrichtung von vorne nach hinten (Forward Looking Aft) |
| GE | General Electric |
| HDT (HPT) | Hochdruckturbine (High Pressure Turbine) |
| HDV (HPC) | Hochdruckverdichter (High Pressure Compressor) |
| HPTACC | aktive Rotor-Spaltkontrolle der Hochdruckturbine (High Pressure Turbine Active Clearance Control) |
| HPTC | Ventilklappenstellung der aktiven Spaltkontrolle (High Pressure Turbine Clearance) |
| HSG | Hochgeschwindigkeitsschleifer (High Speed Grinder) |
| IGV | Eintrittsleitrad des HDV (Inlet Guide Vane) |
| ISA | Internationale Standardatmosphäre (International Standard Atmosphere) |
| MC | maximaler Dauerschub im Reiseflug (Maximum Continuous) |
| N1 | Niederdruckwelle |
| N2 | Hochdruckwelle |
| NDT (LPT) | Niederdruckturbine (Low Pressure Turbine) |
| NDV (LPC) | Niederdruckverdichter (Low Pressure Compressor) |
| SNECMA | Nationale Gesellschaft zur Erforschung und Konstruktion von Flugmotoren (Société Nationale d'Etudes et de Constructions de Moteurs d'Aviation) |
| TC | Gehäusetemperatur der Hochdruckturbine |
| TCRingRat | Temperaturquotient aus Verdichteraustrittstemperatur (T3) und Gehäusetemperatur der Hochdruckturbine (TC) |
| TO | maximaler Startschub (Take Off) |
| VSV | verstellbare Leitschaufeln im Hochdruckverdichter (Variable Stator Vane) |

| Nummerierung | Position im Triebwerk |
|---------------------|--------------------------------|
| 0 | Umgebung |
| 12 | Eintritt Fan |
| 2 | Eintritt Niederdruckverdichter |
| 2,5 | Eintritt Hochdruckverdichter |
| 3 | Austritt Hochdruckverdichter |
| 55 | Austritt Niederdruckturbine |

| Zeichen | Einheit | Bedeutung |
|--------------------------|-------------------|---|
| c | m/s | Geschwindigkeit der Strömung |
| c_p | Nm/(kg·K) | spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck |
| d_{Fan} | mm | Fandurchmesser |
| F | N | Schub |
| P, P_{statisch} | kPa | statischer Druck |
| P_t | kPa | Totaldruck |
| K | | Isentropenexponent |
| l | mm | Länge |
| m_{trocken} | kg | Trockenmasse |
| \dot{m} | kg/s | Massenstrom |
| \dot{m}_I | kg/s | Primärmassenstrom |
| \dot{m}_{II} | kg/s | Sekundärmassenstrom |
| q | kPa | dynamischer Druck |
| T_{statisch} | K | statische Temperatur |
| T, T_t | K | Totaltemperatur |
| V | mm | Betrag der Exzentrizität der Hochdruckwelle |
| V_x | mm | X-Komponente des Betrags der Exzentrizität |
| V_y | mm | Y-Komponente des Betrags der Exzentrizität |
| α | deg | Winkel der Exzentrizität der Hochdruckwelle in Grad |
| β | deg | Winkel der T3-Messsondenpositio in Grad |
| Δ | | Differenz |
| ζ | | Profilverlustbeiwert |
| η_{VS} | % | isentropen Verdichterwirkungsgrad |
| η_{VP} | % | polytroper Verdichterwirkungsgrad |
| Θ | deg | globaler Umlenkwinkel in Grad |
| μ | | Nebenstromverhältnis |
| π_v | | Verdichterdruckverhältnis |
| τ_v | | Verdichtertemperaturverhältnis |
| ρ | kg/m ³ | Dichte |

1 Einleitung

Zertifizierte Wartungsunternehmen von Flugzeugtriebwerken sind durch enge Kalkulationen der Wartungskosten bestrebt, die Triebwerksüberholung individuell zu optimieren. Dabei lässt sich eine gezielte effiziente Wartung bei geringer Durchlaufzeit nur erreichen, wenn der jeweilige Schaden des zu überholenden Triebwerks lokalisiert werden kann. Strömungsmechanische und thermodynamische Untersuchungen geben Aufschluss über gezielte Optimierungs- und Einsparpotentiale, die dann im Wartungsprozess integriert werden.

Da Triebwerkshersteller den unabhängigen Wartungsunternehmen wie Lufthansa Technik AG aus wettbewerbsgründen Wissen vorenthalten und nur begrenzte Auslegungs- und Konstruktionsinformationen preisgeben, wird durch die beschriebenen Analyseverfahren und den Messdaten am werkseigenen Prüfstand eigenes fundiertes Wissen erarbeitet, welches die Grundlage für eine optimale Wartung ist.

Die vorliegende Arbeit knüpft hier an und beschäftigt sich mit dem leistungsstärksten Antrieb des vierstrahligen Langstreckenflugzeugs Airbus A340-200/300, dem CFM56-5C4. Es wird der Einfluss der Gehäuserundheit des Hochdruckverdichters und der Rotor-Exzentrizität der Hochdruckwelle auf das Steuerungssystem der aktiven Rotorspalt-Regelung der Hochdruckturbine untersucht.

Für diese Studie standen vollständige Datensätze von insgesamt 18 überholten Triebwerken zur Verfügung. Dabei wurde am Prüfstand der Betriebsfall des maximalen Startschubs (TO) und des maximalen Dauerschubs (MC) angefahren.

2 Grundlagen

2.1 CFM56-5C4



Abbildung 2.1.1 CFM56-5C4 [LHT]

Für diese Arbeit wird das leistungsstärkste Motormuster der Baureihe CFM56, der CFM56-5C4 (Abbildung 2.1.1) untersucht. Hergestellt wird dieses Triebwerksmuster von CFM International, einem seit Ende der 70er Jahre bestehenden Joint-Venture¹ von General Electric (USA) und SNECMA (Frankreich).

General Electric liefert hierbei das Know-How für den Hochdruckteil des Triebwerks. Wie in der zivilen Luftfahrt üblich, fließen auch in diesem Fall Erkenntnisse und Entwicklungen aus dem Militärbereich ein. Grundlage für den Hochdruckteil ist der von General Electric entwickelte Antrieb für den strategischen Langstreckenbomber Rockwell B-1, der mit vier von GE entwickelten F-101 Turbofantriebwerken ausgestattet ist.

¹ Gemeinschaftsunternehmen

Der Niederdruckteil wird hingegen von SNECMA, dem führenden französischen Unternehmen für Antriebe von Flugzeugen und Raketen, bereitgestellt. Zusammen entsteht eine sehr erfolgreiche Baureihe an Triebwerken.

Der CFM56-5C, der seit 1991 im Einsatz ist, wird in drei verschiedenen Schubkategorien bereitgestellt, wobei der CFM56-5C4 mit einem Gesamtschub von 34.000 lbs (151,3 kN) die leistungsstärkste Schubklasse ist. Einsatz findet das Muster im vierstrahligen Großraumflugzeug Airbus A340-200 und 300 (Abbildung 2.1.2).



Abbildung 2.1.2 A340-300 mit vier CFM56-5C4 Triebwerken [LHT]

Für einen groben Überblick über die Leistung des Motors, sind einige wichtige triebwerksspezifische Daten in der folgenden Tabelle 2.1.1 zusammengefasst.

Tabelle 2.1.1 Technische Daten des CFM56-5C (CFMI)

| Daten | Kürzel | Einheit | CFM56-5C2 | CFM56-5C3 | CFM56-5C4 |
|-----------------------|----------------|---------|-----------|-----------|-----------|
| Nettoschub | F | kN | 138,8 | 144,6 | 151,3 |
| Massenstrom | \dot{m} | kg/s | 465,8 | 465,8 | 483,1 |
| Nebenstromverhältnis | μ | | 6,5 | 6,5 | 6,4 |
| Primärmassenstrom | \dot{m}_I | kg/s | 62,1 | 62,1 | 64,4 |
| Sekundärmassenstrom | \dot{m}_{II} | kg/s | 403,7 | 403,7 | 418,7 |
| Gesamtdruckverhältnis | π | | 37,4 | 37,4 | 38,3 |
| Länge | l | [mm] | 2.616 | 2.616 | 2.616 |
| Fandurchmesser | d_{Fan} | [mm] | 1,836 | 1,836 | 1,836 |
| Trockenmasse | $m_{trocken}$ | kg | 3989,8 | 3989,8 | 3989,8 |

2.2 Aufbau des Triebwerks

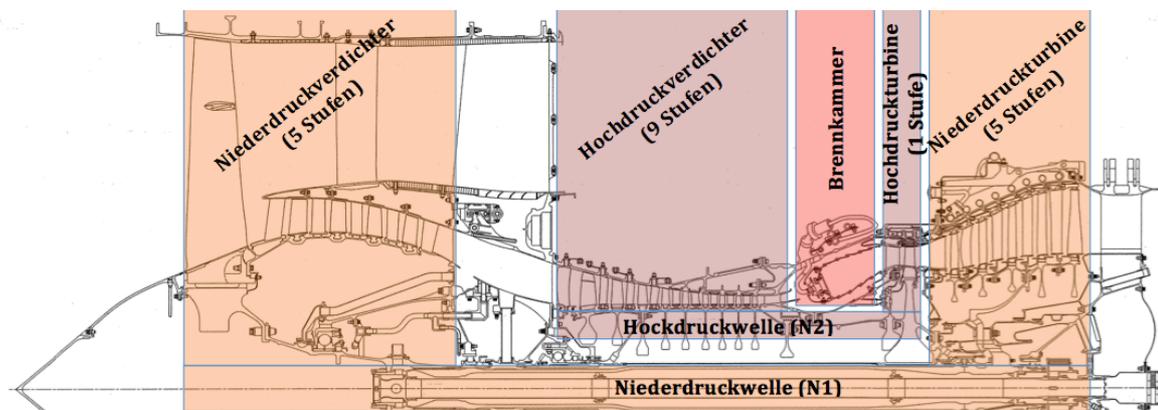


Abbildung 2.2.1 Module der Nieder- und Hochdruckwelle [ESM]

Der CFM56-5C ist ein zweiwelliges Turbofantriebwerk mit einem Nebenstromverhältnis von 6,5. Die Hoch- und Niederdruckwelle ist hierbei rein aerodynamisch miteinander gekoppelt.

In zweiwelligen Triebwerken findet sowohl die Komprimierung durch Verdichterstufen als auch die Nutzung des Ausstoßes durch Turbinenstufen auf zwei Wellen verteilt statt. Dies hat den Vorteil, im Kerntriebwerk (Hochdruckwelle) bei einer fest definierten Blattspitzengeschwindigkeit wegen des kleineren Durchmessers eine wesentlich höhere Drehzahl zu erzeugen. Dies führt unter anderem zu höheren Verdichterdruckverhältnissen und steigert den Verdichtereffizienzgrad.

Der fünfstufige Niederdruckverdichter (NDV), der aus einer Fan- und vier Boosterstufen besteht, wird über die Niederdruckwelle (N1) von der fünfstufigen Niederdruckturbinen (NDT) angetrieben. Die N1-Welle dreht unter „rated TO“ mit rund 4684 U/min. Für den Schub ist der wesentlich höhere Massendurchsatz des Sekundärstroms entscheidend, der einzig und allein durch die Fanstufe und somit durch die N1-Welle beeinflusst wird.

Das Kerntriebwerk besteht aus dem von General Electric gefertigten Hochdrucksystem. Hierbei wird der neunstufige Hochdruckverdichter (HDV) nur von einer einstufigen Hochdruckturbinen (HDT) angetrieben. Das Eintrittsleitrad und die ersten drei Stufen des Hochdruckverdichters sind mit variablen Leitschaufeln ausgestattet. Dies ermöglicht auch

bei niedrigen Drehzahlen ein gutes Betriebsverhalten. Die Hochdruckwelle (N2) hat eine maximal zulässige Drehzahl (N2-redline) von 15189 U/min.

Dem HDV wird an mehreren Positionen Zapfluft entnommen. Dies wird z.B. für die Druckregulierung und Klimaanlage der Kabine, die pneumatischen Systeme und die aktive Spaltkontrolle der Hochdruckturbinen (siehe Kapitel 3.9) benötigt. Die Zapfluentnahme führt jedoch unweigerlich zum Leistungsverlust, weil hierdurch der Massendurchsatz des Primärstroms reduziert wird und folglich der Treibstoffverbrauch steigt.

2.3 Der axiale Hochdruckverdichter

„Die Hauptaufgabe eines Verdichters ist es, das Druckniveau der angesaugten Luft anzuheben, sodass der anschließende Verbrennungsprozess und die Leistungsabgabe über die nachfolgende Turbinen möglichst effizient ausfallen. Die Kompression reduziert das Luftvolumen und erhöht die Dichte“. [Bräunling, 2009, S. 134]

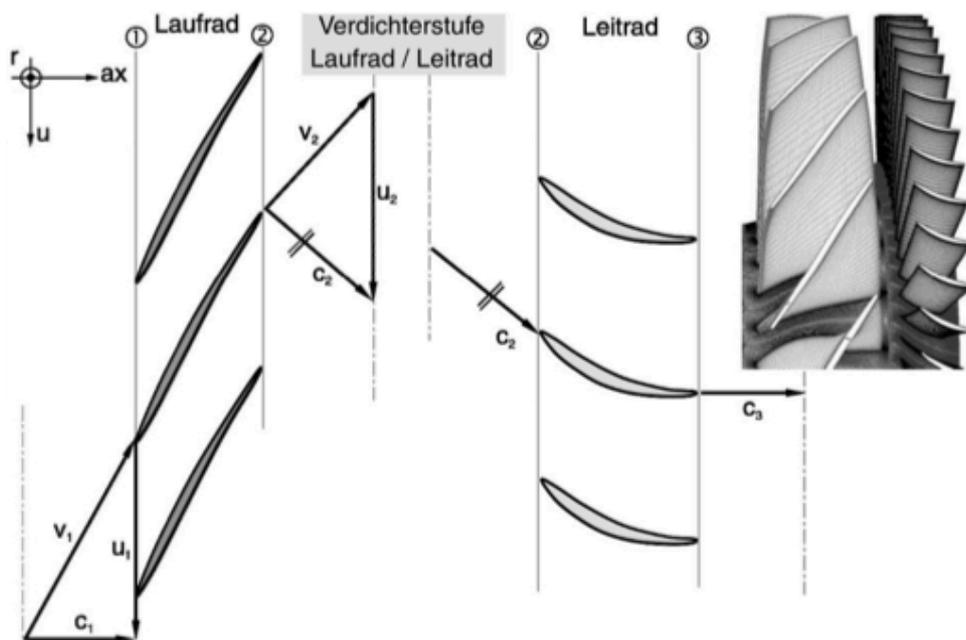


Abbildung 2.3.1 Anordnung einer Axialverdichterstufe [Bräunling]

Ein Verdichter besteht aus mehreren Stufen, wobei jede Stufe aus einem Lauf- und einem nachgeschalteten Leitrad besteht (Abbildung 2.3.1). Je nach Belastung unterscheiden sich die einzelnen Stufen im Material (Tabelle 2.3.1).

Die mit der Hochdruckwelle rotierenden Laufschaufeln besitzen die Profilform eines Tragflügels, welche für einen optimalen Verdichtungsprozess drallfrei (linear) angeströmt werden. In ihrer Abströmung wird jedoch durch den Einfluss der Rotation ein starker Drall erzeugt. Um nun die nächste Laufschaufel ebenfalls drallfrei anströmen zu können, wird jeder Laufschaufel eine am Gehäuse des Hochdruckverdichters stehende Leitschaufel nachgeschaltet, damit der strömenden Luft der Drall entzogen wird und die nächste Laufschaufel ebenfalls drallfrei angeströmt wird.

Tabelle 2.3.1 Material der Schaufeln des Hochdruckverdichters [LHT Training]

| Schaufeln | Stufen | Material |
|-----------|--------|---------------------------------------|
| Rotor | 1-3 | Titanlegierung |
| Rotor | 4-9 | hitzebeständige Nickelbasis-Legierung |
| Stator | 1-9 | hitzebeständige Stahllegierung |

Die Besonderheit des Hochdruckverdichters besteht darin, dass vor der ersten Stufe ein variables Eintrittsleitrad vorgeschaltet wird (Abbildung 2.3.2). Der Winkel der Eintrittsleitschaufeln und der Leitschaufeln der ersten drei Stufen des Hochdruckverdichters ist verstellbar, damit auch bei niedrigen Drehzahlen ein gutes Betriebsverhalten gewährleistet werden kann.

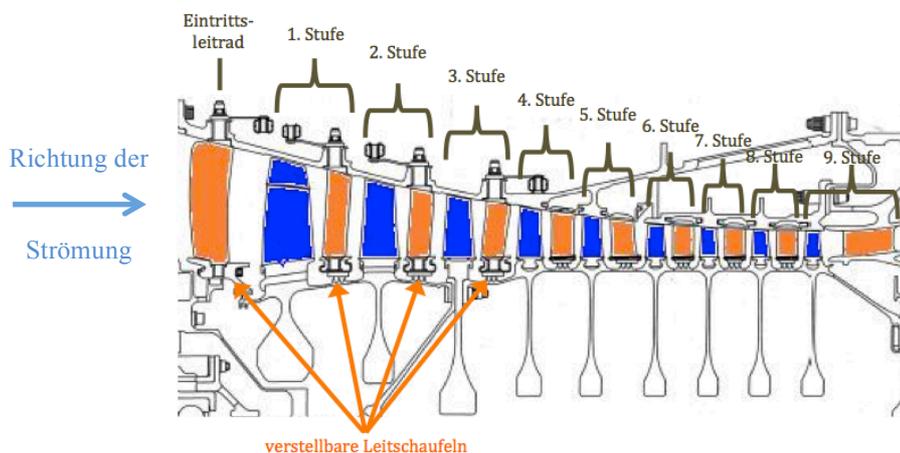


Abbildung 2.3.2 Hochdruckverdichter² des CFM56-5C4 [ESM]

² Abbildung 2.3.2: stehende Leitschaufeln (gelb); Laufschaufeln (blau)

Die durch den Hochdruckverdichter durchströmende Luft wird in den einzelnen Stufen verdichtet, so dass die Querschnittsfläche des Strömungskanals mit Fortschritt des Verdichtens reduziert werden muss, um die axiale Strömungsgeschwindigkeit konstant zu halten. Die Reduzierung wird durch einen angepassten Gehäusedurchmesser erreicht (fallendes Gehäuse), wobei der Nabenradius konstant bleibt.

Damit besitzen die Laufschaufeln der vorderen Stufen einen wesentlich größeren Blattspitzenradius, so dass bei gleicher Drehzahl eine wesentlich höhere Blattspitzengeschwindigkeit erreicht wird. Diese hohe Blattspitzengeschwindigkeit der Laufschaufeln führt im Bereich der Laufschaufelspitzen zu lokalen Überschallgebieten. Aus diesem Grund werden die vorderen Stufen transsonisch ausgelegt.

Moderne Hochdruckverdichter sind so aufgebaut, dass der Blattspitzenradius der Laufschaufeln in allen Stufen konstant ist und die Reduzierung der Querschnittsfläche durch Anpassung des Nabenradius erreicht wird. Somit ist die Blattspitzengeschwindigkeit in allen Stufen konstant und der Hochdruckverdichter kann komplett transsonisch betrieben werden. Dies ermöglicht wesentlich höhere Druckverhältnisse bei gleicher Stufenzahl. Der neunstufige Hochdruckverdichter des CFM56-5C4 erreicht ein Druckverhältnis von 11/1. Ein moderner zehnstufiger Hochdruckverdichter der NASA schafft hingegen ein Druckverhältnis von 22/1.

Der HDV komprimiert die Luft, indem die Verdichterschaufeln eine aerodynamische Wirkung auf die Strömung ausüben. Durch die Rotation der Leiträder entsteht, ähnlich wie beim Tragflügel, auf jeder Leitschaufel eine Druck- und eine Saugseite. Die Saugseite saugt die strömende Luft an das Profil heran und versetzt diese in Rotation, so dass die kinetische Energie der Strömung in Form von Drall erhöht wird. Ist dies erreicht, entzieht das nachgeschaltete Leitrad der Strömung den Drall und somit die kinetische Energie, so dass es zu einem Druckanstieg kommt. Durch die hohe Drehzahl der N2-Welle wird dieser Vorgang begünstigt, so dass ein größeres Drucksteigerungsverhältnis je Stufe erreicht werden kann.

2.4 Die axiale Hochdruckturbinen

Die Aufgabe der einstufigen Hochdruckturbinen besteht darin, den neunstufigen Hochdruckverdichter und die angeschlossenen Hilfsaggregate über die Hochdruckwelle anzutreiben. Hierfür wird dem aus der Brennkammer kommenden Heißgas Energie entzogen. Durch das Leistungsgleichgewicht entzieht die Hochdruckturbinen dem aus der Brennkammer strömenden Heißgas soviel Energie, wie benötigt wird um, den Hochdruckverdichter und die Hilfsaggregate anzutreiben (Abbildung 2.4.2).

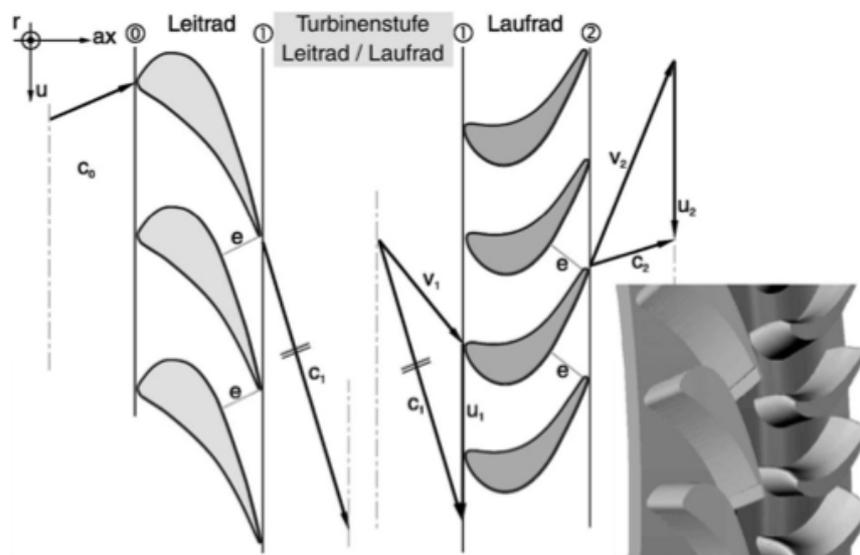


Abbildung 2.4.1 Anordnung einer Axialturbinenstufe [Bräunling]

Der CFM56-5C4 besitzt nur eine einstufige Hochdruckturbinen. Anders als beim Hochdruckverdichter ist in einer Turbinen immer das Leitrad vor dem Laufrad positioniert (Abbildung 2.4.1). Da die Hochdruckturbinen direkt hinter der Brennkammer folgt, wirken auf die Schaufeln besonders hohe Belastungen, da hier eine kombinierte Beanspruchung aus hoher Drehzahl und hoher Temperatur vorliegt. Die Temperatur des Heißgases liegt sogar über dem Schmelzpunkt des Schaufelmaterials. Nur durch ausgeklügelte Kühlturbinentechniken halten die zusätzlich beschichteten Schaufeln den Temperaturen stand.

Das gesamte Triebwerk ist so ausgelegt, dass der engste Querschnitt direkt hinter der Brennkammer im Leitrad der Hochdruckturbinen vorzufinden ist. Somit wird hier der maximale korrigierte Massendurchsatz festgelegt, da im engsten Querschnitt die Machzahl

der Primärströmung genau $M_a=1$ beträgt. Durch Erhöhung des Totaldrucks bzw. Reduzierung der Totaltemperatur lässt sich jedoch der nichtkorrigierte Massendurchsatz weiter steigern. Weil das Triebwerk so ausgelegt wurde, dass es schon bei niedriger Belastung sperrt, ist die Funktion der Hochdruckturbinen von besonderem Interesse, da schon kleine Unstimmigkeiten im Bereich des engsten Querschnitts einen direkten Einfluss auf die Gesamtleistung des Triebwerks haben.

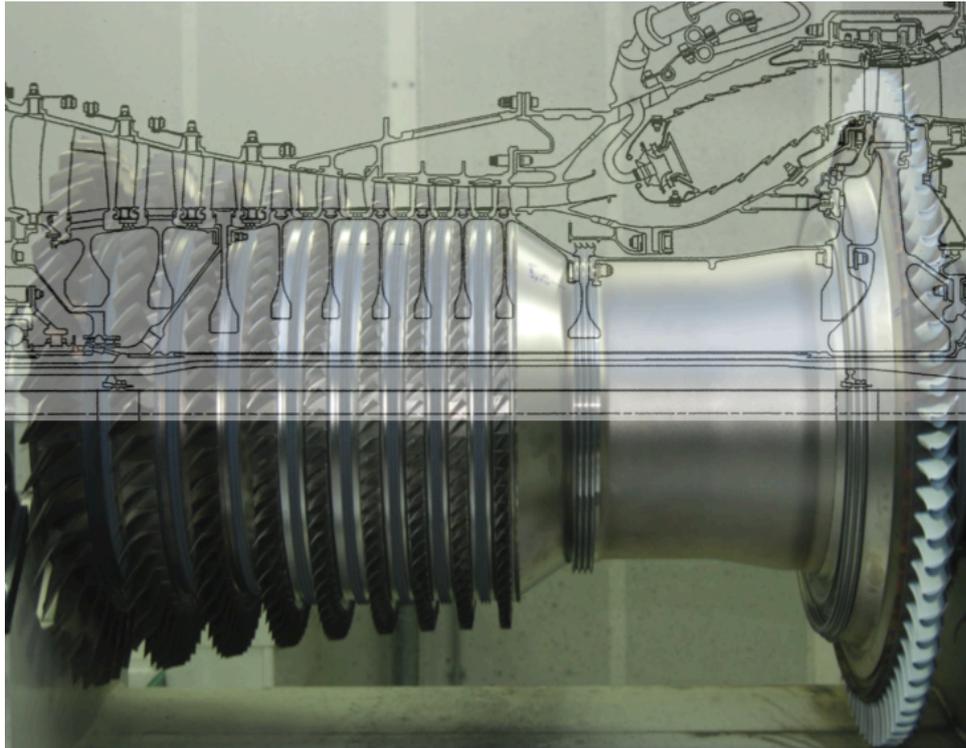


Abbildung 2.4.2 Hochdruckwelle mit Laufschaufeln (HDV+HDT) [ESM]

In dem düsenförmigen Einlauf des Leitrades der Hochdruckturbinen werden die Wärme und der Druck des Heißgases in Geschwindigkeit der Strömung überführt. Diese kinetische Energie des Heißgases wird im Laufrad der Hochdruckturbinen in mechanische Energie in Form eines Drehmomentes umgewandelt.

2.5 Tipspalt

Um die Leistungsfähigkeit und somit den Wirkungsgrad des gesamten Motors zu verbessern, besteht ein großes Interesse, den Spalt zwischen stehenden und rotierenden Bauteilen im Triebwerk so klein wie möglich zu halten, um etwaige Strömungsverluste (Kapitel 2.6) zu minimieren.

Der Tipspalt zwischen dem Laufrad und dem Gehäuse ist ein solches Beispiel. Dabei ist dieser Spalt sowohl im Verdichter als auch in der Turbine vorhanden. Da sich diese Arbeit mit dem Hochdrucksystem befasst, wird hier nur der Tipspalt des Hochdruckverdichters und der Hochdruckturbine untersucht.

Im Folgenden sind alle einflussnehmenden Größen des Tipspaltes für beide zu untersuchenden Module in der Tabelle 2.5.1 aufgelistet.

Tabelle 2.5.1 Einflussgrößen auf den Tipspalt

| Module | Einflussgrößen |
|---------------------|---|
| Hochdruckverdichter | HSG-Schliff lokale Unrunde des Gehäuses Rotor-Exzentrizität der Hochdruckwelle Längsdehnung durch Fliehkraft und Wärmeeinfluss |
| Hochdruckturbine | HSG-Schliff lokale Unrunde des Gehäuses Rotor-Exzentrizität der Hochdruckwelle Längsdehnung durch Fliehkraft und Wärmeeinfluss Aktive Spaltkontrolle (HPTACC) |

Im HSG wird die Länge der Laufschaufeln dem Gehäuse angepasst und mit dem im Manual vorgeschriebenen Spalt zurechtgeschliffen, damit es zu keinem Kontakt zwischen Gehäuse und Laufschaufeln kommt.

Der eingestellte Tipspalt wird jedoch durch die lokale Unrunde des HDV-Gehäuses (Kapitel 3.6) und der Rotor-Exzentrizität der Hochdruckwelle (Kapitel 3.7) zusätzlich beeinflusst. Die aktive Spaltkontrolle der Hochdruckturbine (Kapitel 3.9) minimiert durch gezielte Gehäusekühlung den Spalt, wobei lediglich der Einfluss der Parameter auf die Steuerung ausgewertet wird.

2.6 Strömungsverluste

Jede Strömung ist verlustbehaftet. Um unter anderem den Zusammenhang des Tipspaltes mit dem sich einstellenden Temperaturniveau im Hochdruckverdichter vergleichen und bewerten zu können, ist es wichtig, die auftretenden Strömungsverluste zu kennen.

Profilverluste

Ludwig Prandtl hat an einem umströmten Körper die Strömung in zwei Bereiche eingeteilt:

- reibungsfreie Außenströmung
- reibungsbehaftete Grenzschichtströmung³ in Nähe des Körpers

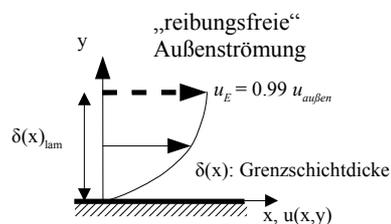


Abbildung 2.6.1 Grenzschicht [Schulze]

Wird ein Körper, wie z.B. eine Schaufel, von einem Fluid umströmt, übt die durch Reibung erzeugte Wandhaftung einen Einfluss auf das Geschwindigkeitsprofil senkrecht zur angeströmten Oberfläche in Profilmähe aus. Die Wandhaftung ist so stark, dass das umströmende Fluid direkt auf der Oberfläche zum Stillstand kommt. Derselbe Effekt ist auch an der Gehäusewandung des Strömungskanals zu betrachten. Die Profilverluste lassen sich hierbei auf zwei Wegen berechnen.

Mit der Kenntnis, dass durch Profilverluste ein Teil der Strömungsenergie in Wärme umgewandelt wird, kann der Verlustbeiwert ζ durch die Ermittlung der Totaldruckverluste berechnet werden. Dabei sind für die Berechnung die Totaldrücke vor und hinter den Leit- bzw. Laufschaufeln notwendig.

³ Die Grenzschicht definiert den Bereich, ab dem die Strömungsgeschwindigkeit infolge von Wandhaftung abnimmt

Eine weitere Möglichkeit, die bei Flügelprofilen Anwendung findet, ist die Messung der Strömungsgeschwindigkeit hinter dem Profil. Die erfasste Nachlaufdelle⁴ enthält ebenso alle relevanten Informationen des Profils. Das Integral der Nachlaufdelle (Profilwiderstandsbeiwert) wird nur noch mit der Profillänge multipliziert und man erhält den gesamten Profilwiderstand.

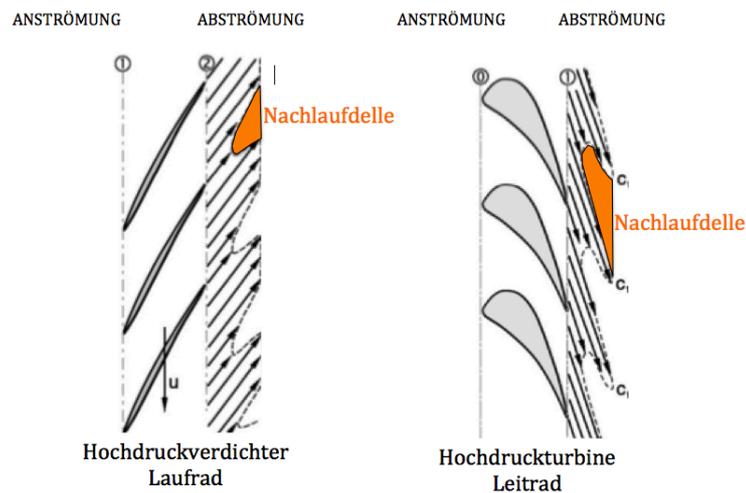


Abbildung 2.6.2 Nachlaufdelle [Bräunling]

Spaltverluste

Zwischen der Gehäusewandung und der Blattspitze der Laufschaufeln ist ein Spalt zwingend notwendig, um einen Kontakt und somit einen Materialabtrag während des Betriebes auszuschließen. Der Spalt ist wegen der Temperaturexpansion des Materials, der auf die Leiträder wirkenden Fliehkraft, der Rotor-Exzentrizität und der Schaufelverformung durch das Druckniveau so auszulegen, dass es unter diesen kombinierten Bedingungen zu keinem Kontakt beider Bauteile kommt.

Ähnlich wie Tragflächen im Geradeausflug erzeugen auch Laufräder durch Rotation eine Profilmströmung, die zu Druckunterschieden zwischen Saug- und Druckseite führt. Wegen des zuvor erklärten Spaltes und des dort herrschenden Druckunterschieds zwischen Saug- und Druckseite kommt es unweigerlich an der Blattspitze der Laufschaufeln zum Druckausgleich, indem die Luft über die Blattspitze von der Druck- zur Saugseite strömt.

⁴ Nachlaufdellen sind verzögerte Geschwindigkeitsprofile hinter dem umströmten Körper

Diese Spaltströmung überlagert sich mit der Hauptströmung und bildet einen spiralförmigen Randwirbel, welcher die Strömung beeinflusst und zu Strömungsverlusten führt. Zum einen führt der auf den Schaufelspitzen beschriebene Druckausgleich dazu, dass das optimale Drucksteigerungsverhältnis nicht erreicht werden kann, weil ein Bruchteil des Massestroms auf die Saugseite zurückströmt, und zum anderen entstehen durch die spiralförmigen Randwirbel lokale Ablösegebiete der Grenzschicht an der Wandung des Strömungskanals.

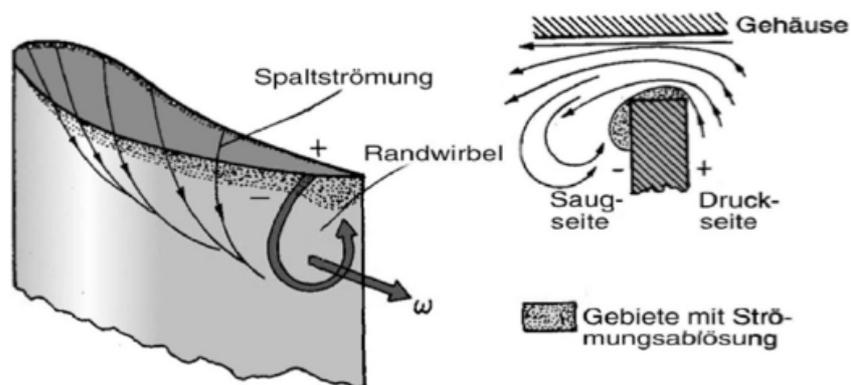


Abbildung 2.6.3 Spaltwirbel [Bräunling]

2.7 Thermodynamische Zustandsgrößen

Diese praktische Arbeit ist auf die Messung einiger thermodynamischer Zustandsgrößen vom Prüfstand angewiesen.

Statischer Druck (p)

Der statische Druck p ist der wahre Druck eines Fluids ohne Berücksichtigung der kinetischen Energie. Da durch die Wandhaftung das bewegte Fluid auf der umströmten Fläche still steht, kann durch eine einfache Bohrung senkrecht zur umströmten Fläche der statische Druck gemessen werden, da nur hier die kinetische Energie nicht vorhanden ist. Der ruhende Umgebungsdruck ist ebenfalls ein statischer Druck.

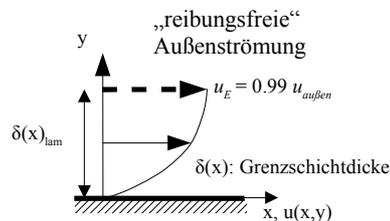


Abbildung 2.7.1 Wandhaftung [Schulze]

Totaldruck (P_t)

Wird eine Druckmesssonde direkt in die Strömung gehalten, wird der Totaldruck gemessen. Dieser setzt sich aus dem statischen und dem dynamischen Druck zusammen, wobei im dynamischen Druck die kinetische Energie des Fluids anhand der Dichte und der Strömungsgeschwindigkeit enthalten ist.

$$P_t = p + q = p + \frac{\rho}{2} \cdot c^2$$

Formel 2.7.1 Totaldruck

Totaltemperatur (T_t)

Entsprechend zum Totaldruck setzt sich die Totaltemperatur ebenfalls aus einer statischen und einer dynamischen Komponente zusammen. Gemessen wird immer die Totaltemperatur. Durch die Strömungsgeschwindigkeit, der dynamischen Temperatur und der spezifischen isobaren Wärmekapazität kann bei Bedarf die statische Temperatur ermittelt werden.

$$T = T_{\text{statisch}} + \frac{c^2}{2 \cdot c_p}$$

Formel 2.7.2 Totaltemperatur

2.8 Verdichterwirkungsgrad

Thermodynamische Prozesse lassen sich in idealen Vorgängen durch reversible Zustandsänderungen oder in realen Vorgängen durch irreversible Zustandsänderungen beschreiben.

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik besagt hierbei, dass Energie während einer Zustandsänderung nicht verbraucht, sondern lediglich umgewandelt werden kann (z.B. in Wärme oder mechanische Arbeit). Die Effizienz der Energieumwandlung wird dabei durch den Wirkungsgrad definiert. Sowohl der Verdichter als auch die Turbine besitzen einen eigenen Wirkungsgrad, da beide Energie umwandeln. Detailliertere Informationen kann der Fachliteratur [Bräunling, 2009, S. 863 ff.] entnommen werden.

$$\text{Wirkungsgrad} = \frac{\text{gewollter energetischer Nutzen}}{\text{erforderlicher energetischer Aufwand}}$$

Formel 2.8.1 Wirkungsgrad

Unter der Annahme, dass jede Stufe des Hochdruckverdichters dasselbe Verdichterdruckverhältnis und denselben Wirkungsgrad besitzt, kann lediglich durch die vollständigen thermodynamischen Zustandsgrößen (Totaldruck und Totaltemperatur) am Ein- und Austritt des Hochdruckverdichters der Wirkungsgrad bestimmt werden. Hierbei wird die Leistung des realen Verdichters im Verhältnis zum idealen Vergleichsverdichter gesetzt.

Isentroper Verdichterwirkungsgrad

| isentroper Verdichterwirkungsgrad | mit Verdichterdruckverhältnis | und Verdichtertemperaturverhältnis |
|--|-----------------------------------|---------------------------------------|
| $\eta_{Vs} = \frac{\pi_V^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1}{\tau_V}$ | $\pi_V = \frac{P_{t3}}{P_{t2.5}}$ | $\tau_V = \frac{T_{t3}}{T_{t2.5}}$ |
| $\eta_{Vs} = \frac{\left(\frac{P_{t3}}{P_{t2.5}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1}{\frac{T_{t3}}{T_{t2.5}}}$ | | |

Formel 2.8.2 isentroper Verdichterwirkungsgrad

Polytroper Verdichterwirkungsgrad

| polytroper Verdichterwirkungsgrad | mit Verdichterdruckverhältnis | und Verdichtertemperaturverhältnis |
|--|-----------------------------------|---------------------------------------|
| $\eta_{vp} = \frac{\ln\left(\pi_v^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right)}{\ln(\tau_v)}$ | $\pi_v = \frac{P_{t3}}{P_{t2.5}}$ | $\tau_v = \frac{T_{t3}}{T_{t2.5}}$ |
| $\eta_{vp} = \frac{\ln\left(\left(\frac{P_{t3}}{P_{t2.5}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right)}{\ln\left(\frac{T_{t3}}{T_{t2.5}}\right)}$ | | |

Formel 2.8.3 polytroper Verdichterwirkungsgrad

2.9 Aktive Spaltkontrolle der Hochdruckturbinen

Die einstufige Hochdruckturbinen wird direkt mit dem Heißgas der Brennkammer durchströmt. Hierbei variiert das jeweilige Temperaturniveau stark abhängig von dem geforderten Schub und weiteren Einflüssen, wie z.B. der Umgebungstemperatur. Der Spalt zwischen den rotierenden Laufschaufeln und dem Gehäuse des Hochdruckverdichters verändert sich durch diese unterschiedlichen thermischen und mechanischen Belastungen fortwährend. Hierbei reagiert das dünnwandige Gehäuse viel empfindlicher auf Temperatur- und Druckschwankungen als die Laufschaufeln, wodurch der Spalt besonders in transienten Manövern stark variiert.

Ist der Spalt durch eine zu niedrige HDT-Gehäusetemperatur zu klein, kommt es zum Materialabtrag. Ist dieser wegen einer zu hohen HDT-Gehäusetemperatur zu groß, entstehen große Strömungs- und somit auch Leistungsverluste, die durch einen höheren Kraftstoffverbrauch kompensiert werden müssen.

Die aktive Kühlung des HDT-Gehäuses erhöht den Turbinenwirkungsgrad und minimiert somit die Leistungsverluste, indem durch eine gezielte Gehäusekühlung der optimale Spalt in jedem Betriebsfall eingestellt wird.

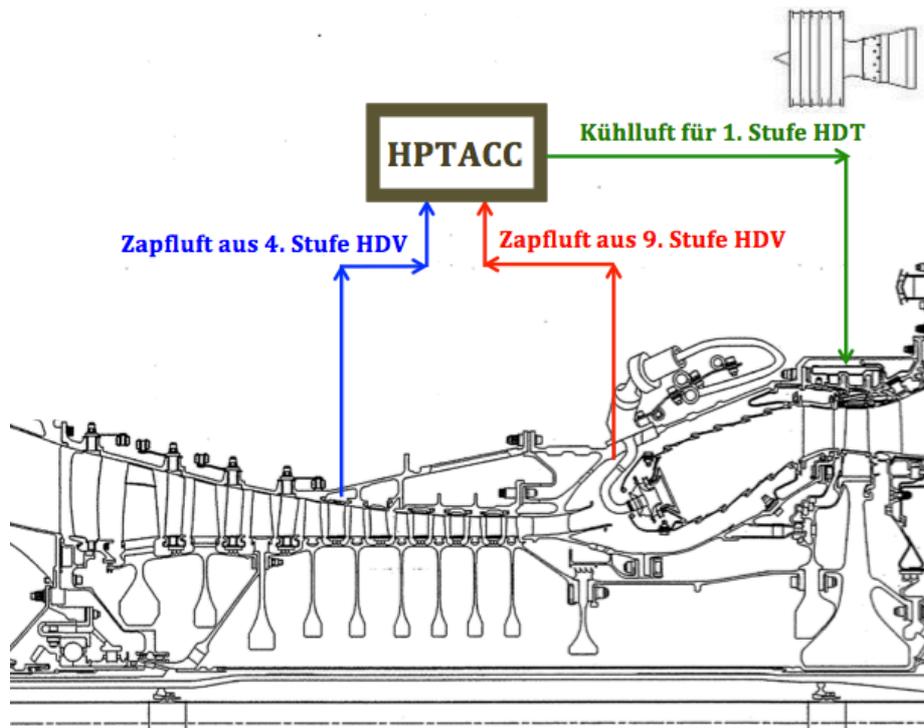


Abbildung 2.9.1 Kühlluft für die aktive HDT-Spaltkontrolle [ESM]

Hierfür wird der vierten und neunten Stufe des Hochdruckverdichters Zapfluft entnommen und abhängig von weiteren Parametern in einem bestimmten Mischverhältnis dem HDT-Gehäuse zugeführt (Abbildung 2.9.1), um dieses soweit zu kühlen, bis der Spalt zwischen Laufschaufel und Gehäuse optimal ist (Abbildung 2.9.2). Wie die Regelung im einzelnen funktioniert, ist dem Kapitel 3.9 zu entnehmen.

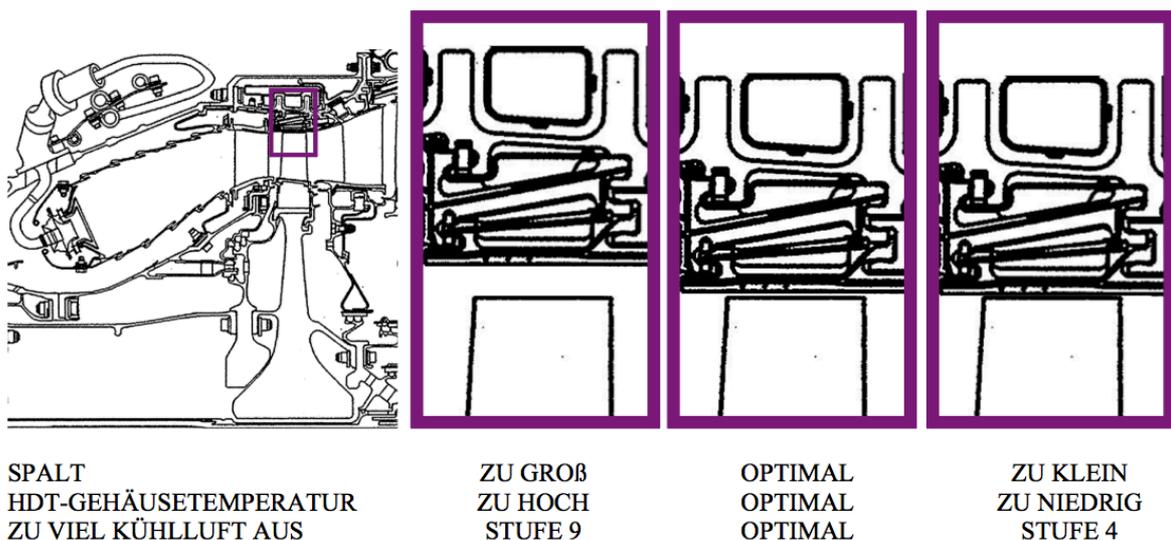


Abbildung 2.9.2 Auswirkung der HDT-Gehäusetemperatur auf den Tipspalt [ESM]

2.10 Koordinatensystem

In der gesamten Ausarbeitung fliegt das Flugzeug von rechts nach links. Dies bedeutet, dass ebenfalls in allen Kapiteln das Triebwerk so aufgebaut ist, dass die Luft links angesaugt und rechts ausgestoßen wird (Abbildung 2.10.1).

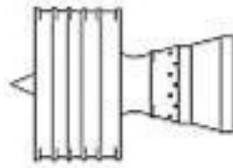


Abbildung 2.10.1 Flugrichtung des Triebwerks [ESM]

Ebenfalls wird festgelegt, dass immer von hinten nach vorne das Triebwerk betrachtet wird. Diese Blickrichtung wird im englischen mit „Aft Looking Forward“ (ALF) bezeichnet. Hierbei ist auch das Koordinatensystem wie folgt festgelegt. Oben auf der 12-Uhr-Position ist Winkelposition 0° . Das Koordinatensystem dreht dabei immer im Uhrzeigersinn (ALF).

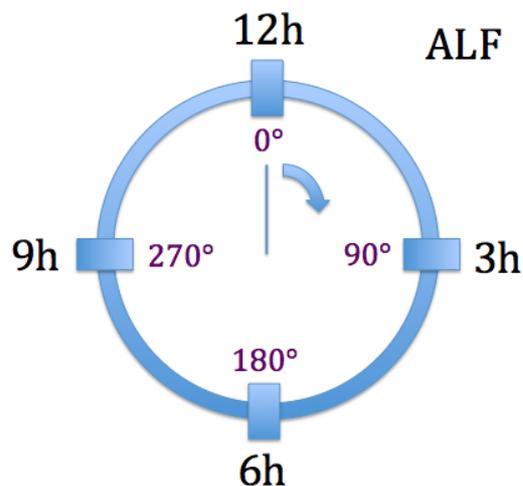


Abbildung 2.10.2 Koordinatensystem (ALF)

3 Messinstrumentierung

Um sich in Kapitel 4 auf die reine Auswertung beziehen zu können, wird in diesem Kapitel ein Einblick in das grundlegende Verständnis der Daten gegeben.

3.1 Prüfstand



Abbildung 3.1.1 Prüfstand mit installiertem Triebwerk (CFM56-5C4)

Der Prüfstand (Abbildung 3.1.1) dient allen Triebwerken zur Eingangs- & Ausgangskontrolle. Dabei werden für die Leistungsmessung nur stationäre Flugfälle angefahren, da transiente⁵ Manöver keine fixen und somit vergleichbaren Messwerte liefern. Ausnahmen sind Beschleunigungstest, bei der die Zeit gemessen wird. Zu den Flugfällen gehören Take Off (TO) und Maximum Continuous (MC). Für die Messung der Leistung eines Motors wird eine Leistungsstufe so lange gehalten, bis alle Komponenten durchwärmt sind, um eine stabile Messung durch die Sensoren zu gewährleisten.

⁵ Beschleunigungen und Verzögerungen

Um die Messungen von dem Einfluss der jeweiligen Umgebungsbedingungen unabhängig zu machen, werden alle Werte auf ISA Standardatmosphäre korrigiert. Somit lassen sich einfache konventionelle Analysen direkt am Prüfstand durchführen, indem einzelne Messwerte direkt motorübergreifend verglichen werden können.

Damit im Standfall eine vernünftige Anströmung gewährleistet werden kann, wird vor dem Fan ein Glockeneinlauf montiert, um die sonst übliche Strömungsablösung im Faneinlauf durch die starke Umlenkung der ruhenden Umgebungsluft zu verhindern.

3.2 Messdaten

Am Prüfstand werden verschiedenste Messungen im Triebwerk simultan durchgeführt. Der Ausgangspunkt für die Untersuchungen dieser Arbeit wird durch die aktive Spaltkontrolle der Hochdruckturbinen (HPTACC) dargestellt, so dass nur die Messdaten näher betrachtet werden, die im direkten Zusammenhang hierzu stehen. In der folgenden Abbildung 3.2.1 wird die lokale Position dieser Messsonden veranschaulicht.

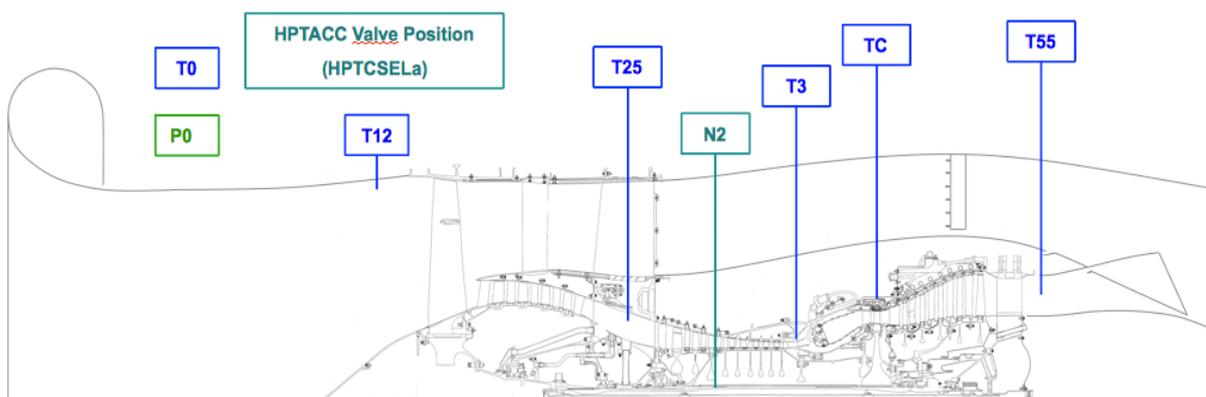


Abbildung 3.2.1 wichtige Messsonden am Triebwerk [ESM]

Die Messsonden sind in zwei Kategorien zu unterteilen. Zum einen die triebwerkseigenen Messvorrichtungen, die den ECU mit Daten versorgen, und zum anderen die Sonderinstrumentierungen, die explizit für den Prüfstand am Motor angebracht werden.

Die Tabelle 3.2.1 zeigt diese beiden Kategorien im Überblick. Auf die T55-Messung wird im Kapitel 3.3 gesondert eingegangen.

Tabelle 3.2.1 Gliederung der Messsonden am Prüfstand

| Messvorrichtung | Bereich | Messgröße | Bezeichnung | Einheit |
|----------------------------|----------------------------------|-------------|-------------|---------|
| Interne Messung für ECU | Umgebung | stat. Temp. | T0 | [K] |
| | Umgebung | stat. Druck | P0 | [PSI] |
| | Hochdruckwelle | Drehzahl | N2 | [RPM] |
| | Eintritt Fan | Totaltemp. | T12 | [K] |
| | Eintritt HPC | Totaltemp. | T25 | [K] |
| | Austritt HPC | Totaltemp. | T3 | [K] |
| | Gehäuse HPT | stat. Temp. | TC | [K] |
| | Ventilklappenstellung des HPTACC | Stellung | HPTC | [%] |
| Prüfstandsinstrumentierung | Umgebung | stat. Temp. | T0 | [K] |
| | Umgebung | stat. Druck | P0 | [PSI] |
| | Austritt HPC | Totaltemp. | T3_6h | [K] |
| | Austritt HPC | Totaltemp. | T3_12h | [K] |
| | Gehäuse HPT | stat. Temp. | TC_0 | [K] |
| | Austritt LPT | Totaltemp. | T55 | [K] |

Verdichteraustrittstemperatur T3

Neben der triebwerkseigenen Verdichteraustrittstemperatur T3_ECU werden zusätzlich zwei weitere Sondermessungen in dieser Ebene angebracht. Im konventionellen Koordinatensystem sind diese Sonden an folgenden Positionen (Tabelle 3.2.2) angebracht.

Tabelle 3.2.2 Positionierung der T3-Messsonden (Austritt des HDV) [LHT]

| Verdichteraustrittstemperatur | Winkel (ALF) |
|-------------------------------|--------------|
| T3_ECU | 9° |
| T3_6h | 189° |
| T3_12h | 324° |

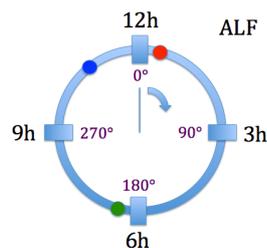


Abbildung 3.2.2 T3-Messsonden

Gehäusetemperatur TC

Die Gehäusetemperatur der Hochdruckturbinen fließt direkt in die Regelung der aktiven Spaltkontrolle ein. Die Gehäusetemperatur ist eine iterativ angepasste Temperatur, da diese sowohl das Ergebnis der Gehäusekühlung der aktiven Spaltkontrolle als auch die zu regulierende Größe ist. Ebenfalls ist der Temperaturquotient (Formel 3.2.1) ein wichtiger Parameter für die HPTACC.

$$T_{CRingRat} = \frac{T_{C_ECU}}{T_{3_ECU}}$$

Formel 3.2.1 TCRingRat

Tabelle 3.2.3 Positionen der TC-Messsonden (Gehäuse der HDT) [LHT]

| Gehäusetemperatur (HPT) | Position (ALF) |
|-------------------------|----------------|
| TC_ECU | 3h |
| TC_0 | 9h |

3.3 T55-Messung

Hinter der Niederdruckturbinen wird ein modifizierter Zwangsmischer mit integrierten Totaltemperaturmesssonden angebracht. Die Aufgabe des Zwangsmischers ist es, den heißen Primärstrom mit dem kühlen Sekundärstrom im Abgasstrahl zu vermischen. Noch vor dem eigentlichen Mischvorgang liegen über den Umfang verteilt 8 Messrechen, die über den prozentualen Radius an zwei bis fünf Stellen die Totaltemperatur des Primärstroms erfassen.

Werden die einzelnen Messungen zusammengefügt, entsteht ein genaues Temperaturprofil im Austritt der Niederdruckturbinen. Somit kann aus den Messdaten sowohl ein Temperaturprofil über den Umfang als auch über den Radius erstellt werden. Die exakte Zuordnung der einzelnen Messpunkte kann dabei der Tabelle 3.3.1 entnommen werden.

Temperaturprofil über den Umfang

Das aufgearbeitete Diagramm 3.3.1 stellt das relative Temperaturprofil über den Umfang des Motors dar. Hierbei werden die relativen Totaltemperaturen beider Flugfälle in einem Kreisdiagramm überlagert und zeigen kaum nennenswerte Unterschiede.

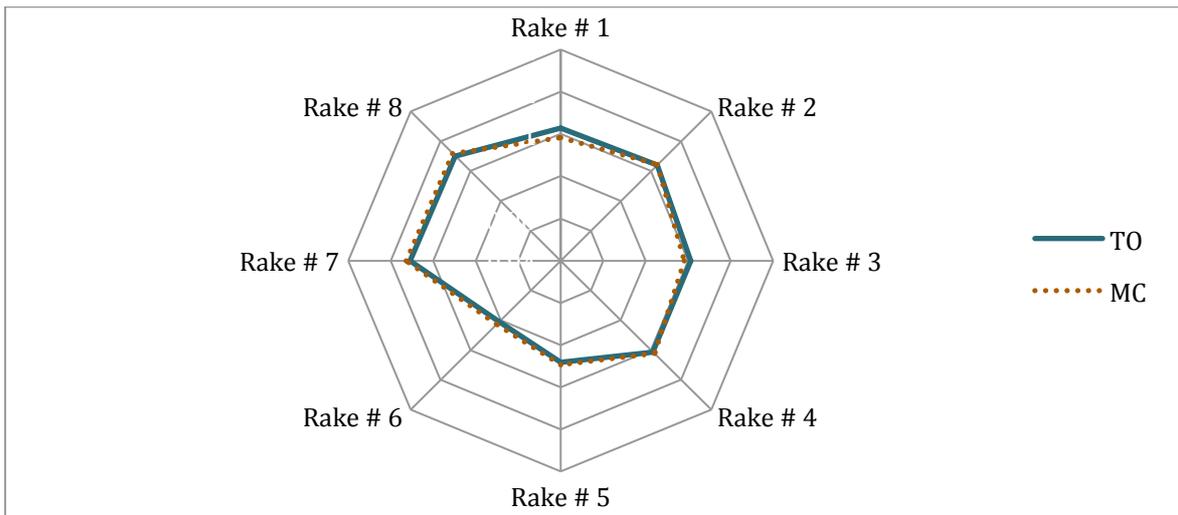


Diagramm 3.3.1 Temperaturprofil über den Umfang

Temperaturprofil über den Radius

Das Diagramm 3.3.2 zeigt das Temperaturprofil über den prozentualen Radius. Hierbei entspricht 0% der Nabe und 100% der Gehäusewandung. Werden diese Rakes in Abhängigkeit der 5 Messpositionen zusammengefasst, ergibt sich für jeden Flugfall nur ein gemitteltes relatives Totaltemperaturprofil über dem prozentualen Radius.

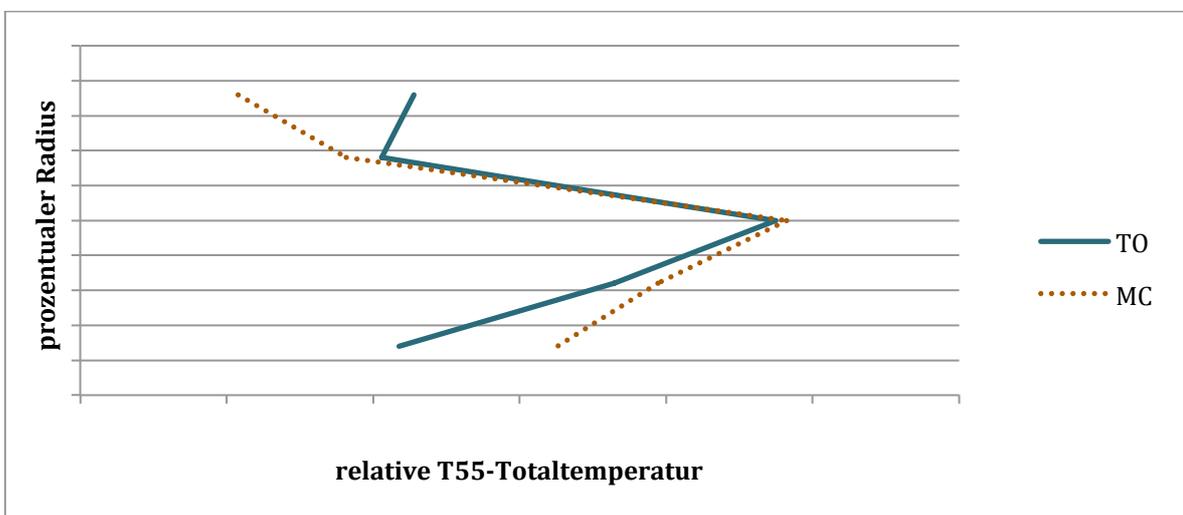


Diagramm 3.3.2 Temperaturprofil über den Radius

3.4 HSG-Spalt

Um im Hochdruckverdichter und in der Hochdruckturbine den Einfluss der Längsdehnung der Laufschaufeln infolge von Fliehkraft und Wärmeausdehnung auszugleichen, werden sowohl das Gehäuse als auch die Laufschaufeln gemäß dem Manual mit einem Spalt geschliffen, damit es nicht zum Kontakt und somit zum Materialabtrag kommt (Tabelle 3.4.1).

Tabelle 3.4.1 HSG-Tipspalt für 2D-Laufschaufeln des CFM56-5C4 [ESM]

| Modul | HDV | | | | | | | | | HDT |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Stufe | 1. | 2. | 3. | 4. | 5. | 6. | 7. | 8. | 9. | 1. |
| Spalt [mm] | 1,37 | 1,57 | 0,81 | 1,17 | 0,79 | 0,86 | 0,79 | 0,76 | 0,79 | 1,60 |

Zunächst wird das Gehäuse des Hochdruckverdichters und der Hochdruckturbine rundgeschliffen und in entsprechenden Rundheitsdiagrammen (Kapitel 3.6) für jede Stufe der globale minimale Radius aufgezeichnet. Hiervon wird nun der Tipspalt (Tabelle 3.4.1) der entsprechenden Stufe abgezogen, so dass nun der maximal mögliche Blattspitzenradius der Laufschaufeln der Hochdruckwelle im High Speed Grinder (HSG) geschliffen werden kann. Dies geschieht mit 2000 Umdrehungen pro Minute. Unter Berücksichtigung der Fertigungstoleranzen passt die Hochdruckwelle mit den Laufschaufeln exakt in das hierfür vorgesehene Gehäuse.



Abbildung 3.4.1 Hochdruckwelle (N2) auf dem HSG

3.5 Strömungsversatz im Hochdruckverdichter

Ein wichtiger und nicht zu ignorierender Einfluss ist der Versatz der Strömung im Hochdruckverdichter. Darunter ist die Fortpflanzung der Strömung durch jede Stufe des Hochdruckverdichters aufgrund der durch die Laufräder erzeugten Drallwirkung zu verstehen.

Ist der Strömungsversatz in jeder Verdichterstufe bekannt, kann dieser, ausgehend von den bekannten Positionen der T_3 -Messsonden (Kapitel 3.2), rückwärts durch den Hochdruckverdichter zurückverfolgt werden, um den Einfluss der Rundheit des HDV-Gehäuses (Kapitel 3.6) lokal einzugrenzen und um die Rotor-Exzentrizität (Kapitel 3.7) zu verstehen, damit die Streuung der Verdichteraustrittstemperatur (Kapitel 3.8) besser untersucht werden kann.

Die Berechnung des Winkelversatzes mit Hilfe von Geschwindigkeitsvektoren ist im Rahmen dieser Arbeit wegen der Komplexität nicht durchzuführen.

Da in der Theorie ein Teilchen vom Eintritt in den Hochdruckverdichter bis zum Austritt verfolgt werden soll, kann dieser räumliche Weg des Teilchens durch eine Stromlinie ersetzt werden. In CFD-Simulationen können genau diese Stromlinien sichtbar gemacht werden. Da der komplette Hochdruckverdichter für die CFD-Simulationen in der Abteilung modelliert (Abbildung 3.5.2) und die Strömung für verschiedene Flugfälle simuliert wurden, wird im Folgenden auf diese Ergebnisse zurückgegriffen, um lediglich die benötigten Informationen des Winkelversatzes für den Flugfall „Take Off“ zu entnehmen. Hierbei wird die Strömung im Mittenschnitt betrachtet (Abbildung 3.5.1). Das bedeutet, dass eine Kontrollfläche genau zwischen der Nabe der Hochdruckwelle und dem HDV-Gehäuse im Umfang gespannt wird, um dort die Strömung sichtbar zu machen.

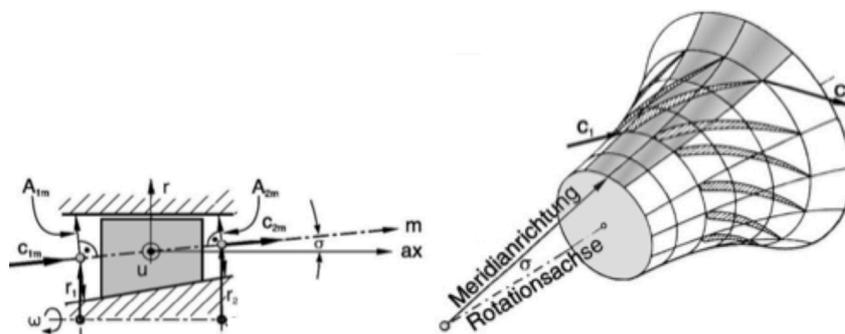


Abbildung 3.5.1 Strömungsfläche im Mittenschnitt [Bräunling]

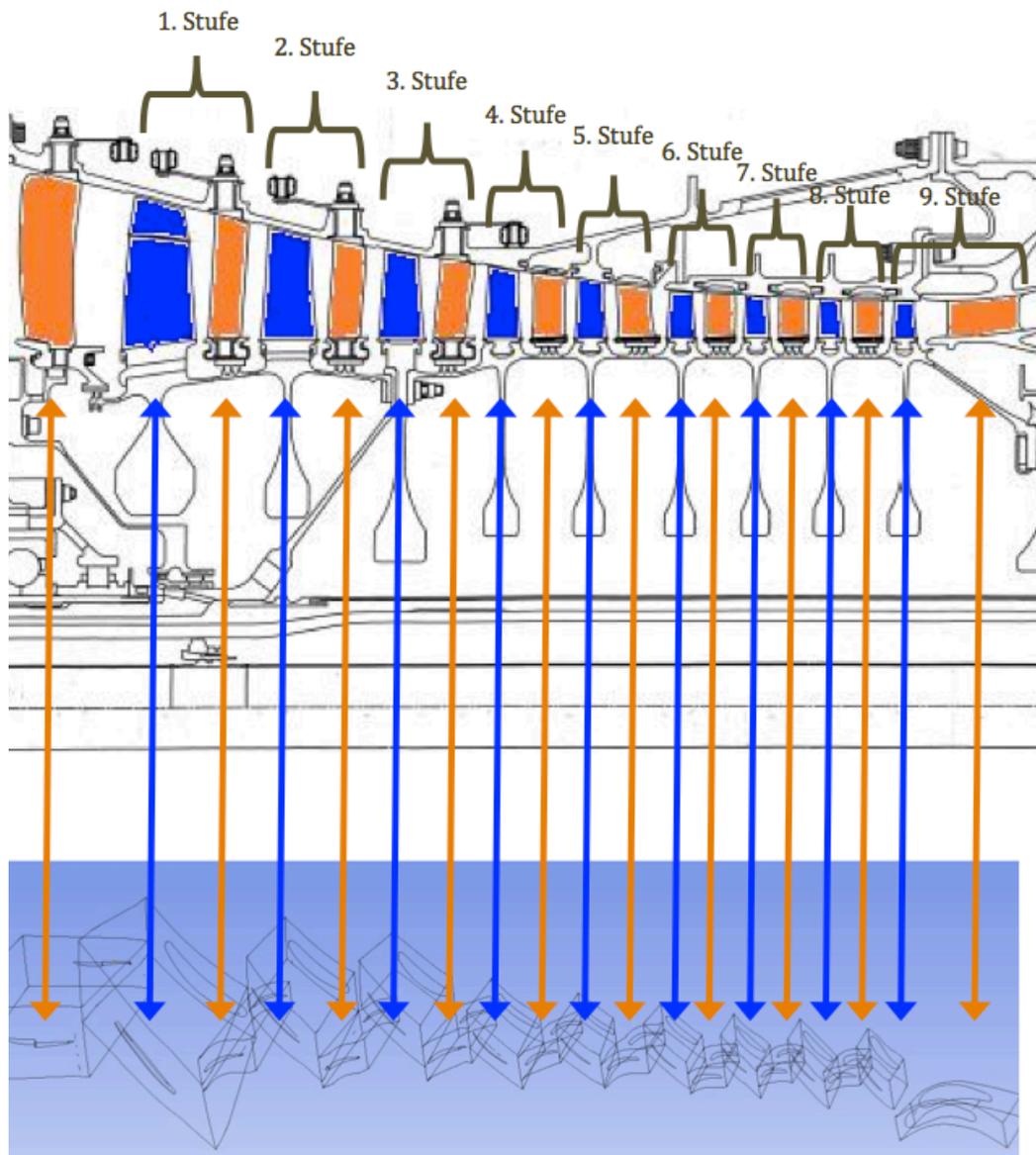


Abbildung 3.5.2 CFD-Simulation des Hochdruckverdichters [ESM]

Im Folgenden wird der globale Umlenkwinkel θ einer Stromlinie vom Eintritt bis zum Austritt jeder Schaufel im Mittenschnitt grafisch verfolgt, um durch den Eintritts- und Austrittswinkel θ die Relativverschiebung zu ermitteln. Da der Strömungsversatz jeder Stromlinie im Ein- und Auslauf nahezu parallel ist, kann irgendeine Stromlinie betrachtet werden.

Sowohl in der Lauf- als auch in der Leitschaufel pflanzt sich der Winkelversatz in Richtung der Rotation der Hochdruckwelle (im Uhrzeigersinn ALF) fort.

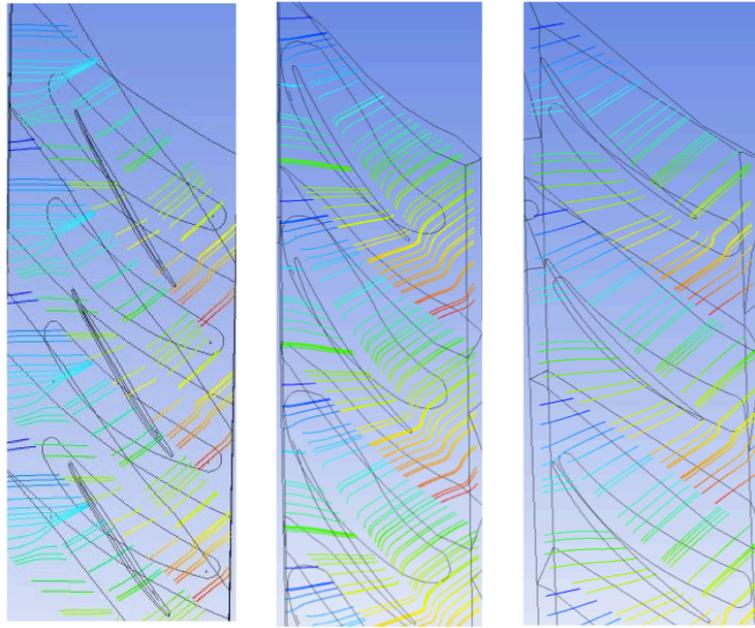


Abbildung 3.5.3 Stromlinien der Laufschaufeln (1. Stufe, 5. Stufe und 9. Stufe) [LHT]

Der Winkelversatz der Strömung durch die rotierenden Laufschaufeln (Abbildung 3.5.3) ist in den vorderen Stufen groß ($7,5^\circ$) und nimmt in den hinteren Stufen ($1,95^\circ$) ab. Dies wird unter anderem durch die Schaufelgeometrie, den Mittenschnittradius, den Anstellwinkel, die Anzahl der Schaufeln pro Stufe und die Überlagerung von Axial- und Radialströmungskomponenten beeinflusst.

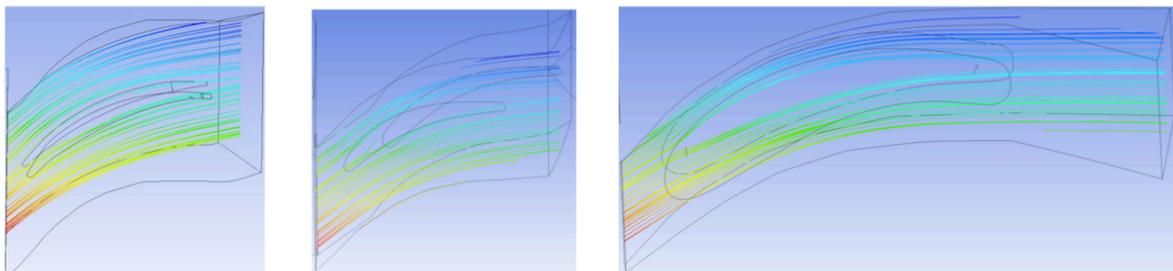


Abbildung 3.5.4 Stromlinien der Leitschaufeln (1. Stufe, 5. Stufe und 9. Stufe) [LHT]

Die stehenden Leitschaufeln (Abbildung 3.5.4) lenken die mit Drall versetzten Abströmung der vorgeschalteten Laufschaufeln um und erzeugen eine möglichst lineare drallfreie Anströmung der nachfolgenden Laufschaufeln. Diese weisen ebenfalls einen Strömungsversatz in Rotationsrichtung der Laufschaufeln auf, die in den hinteren Stufen immer kleiner wird.

Der komplette Winkelversatz jeder Stufe des Hochdruckverdichters ist in der Tabelle 3.5.1 zusammengefasst. Da die Positionen der T3-Temperaturmesssonden hinter dem Hochdruckverdichter und der Strömungsversatz jeder einzelnen Stufe im Hochdruckverdichter bekannt sind, kann zurückgerechnet werden, an welcher Position die Strömung vorbeiströmen muss, bevor diese auf die jeweilige Messsonde fällt. Unter dieser Betrachtung lassen sich die lokalen Unebenheiten der Rundheit oder auch der Einfluss der Exzentrizität auf die Streuung der Verdichteraustrittstemperatur genauer untersuchen.

Der untere Abschnitt der Tabelle 3.5.1 wurde ausgehend von den Koordinaten der T3-Messung und dem Strömungsversatz auf jede einzelne Stufe zurückgeführt.

Tabelle 3.5.1 Winkel des Strömungsversatzes im HDV (T3-Positionen)

| | Stufe 1 | Stufe 2 | Stufe 3 | Stufe 4 | Stufe 5 | Stufe 6 | Stufe 7 | Stufe 8 | Stufe 9 | T3- Ebene |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------------|
| Rotor | 7,54 | 6,74 | 6,48 | 4,55 | 2,99 | 2,85 | 2,26 | 1,95 | 2,13 | |
| Stator | 3,12 | 2,59 | 2,87 | 3,74 | 3,04 | 1,64 | 1,49 | 1,39 | 3,77 | |
| Gesamt | 10,66 | 9,32 | 9,35 | 8,30 | 6,03 | 4,49 | 3,75 | 3,34 | 5,90 | |
| T3_6h | 127,8 | 138,4 | 147,8 | 157,2 | 165,5 | 171,5 | 176,0 | 179,8 | 183,1 | 189,0 |
| T3_12h | 271,8 | 282,4 | 291,8 | 301,2 | 309,5 | 315,5 | 320,0 | 323,8 | 327,1 | 333,0 |
| T3_ECU | 307,8 | 318,4 | 327,8 | 337,2 | 345,5 | 351,5 | 356,0 | 359,8 | 3,1 | 9,0 |

Die Aussage der Tabelle 3.5.1 wird auf der folgenden Seite in Abbildung 3.5.5 grafisch sichtbar gemacht. Hierbei ist der Strömungsversatz in jeder Stufe durch die farblich getrennten T3-Messsonden umgesetzt. Die Blickrichtung „Aft Looking Forward“ ist für den Triebwerksbau einheitlich geregelt.

Dennoch muss das Ergebnis dieser Drallwirkung kritisch betrachtet werden. Hierbei handelt es sich nur um den Versatz der Hauptströmung, da eine reine zwei-dimensionale Strömungsanalyse im Mittenschnitt durchgeführt wurde. Die Spaltströmung im Bereich der Blattspitzen bzw. in Spaltnähe der Laufräder verhält sich anders, da hier eine Überlagerung der Hauptströmung mit der Sekundärströmung stattfindet. Für die Gegenüberstellung mit der Rundheit des HDV-Gehäuses ist jedoch gerade diese Spaltströmung wichtig. Im Rahmen dieser Arbeit wurde jedoch nur die Primärströmung ohne den Einfluss der Sekundärströmung betrachtet.

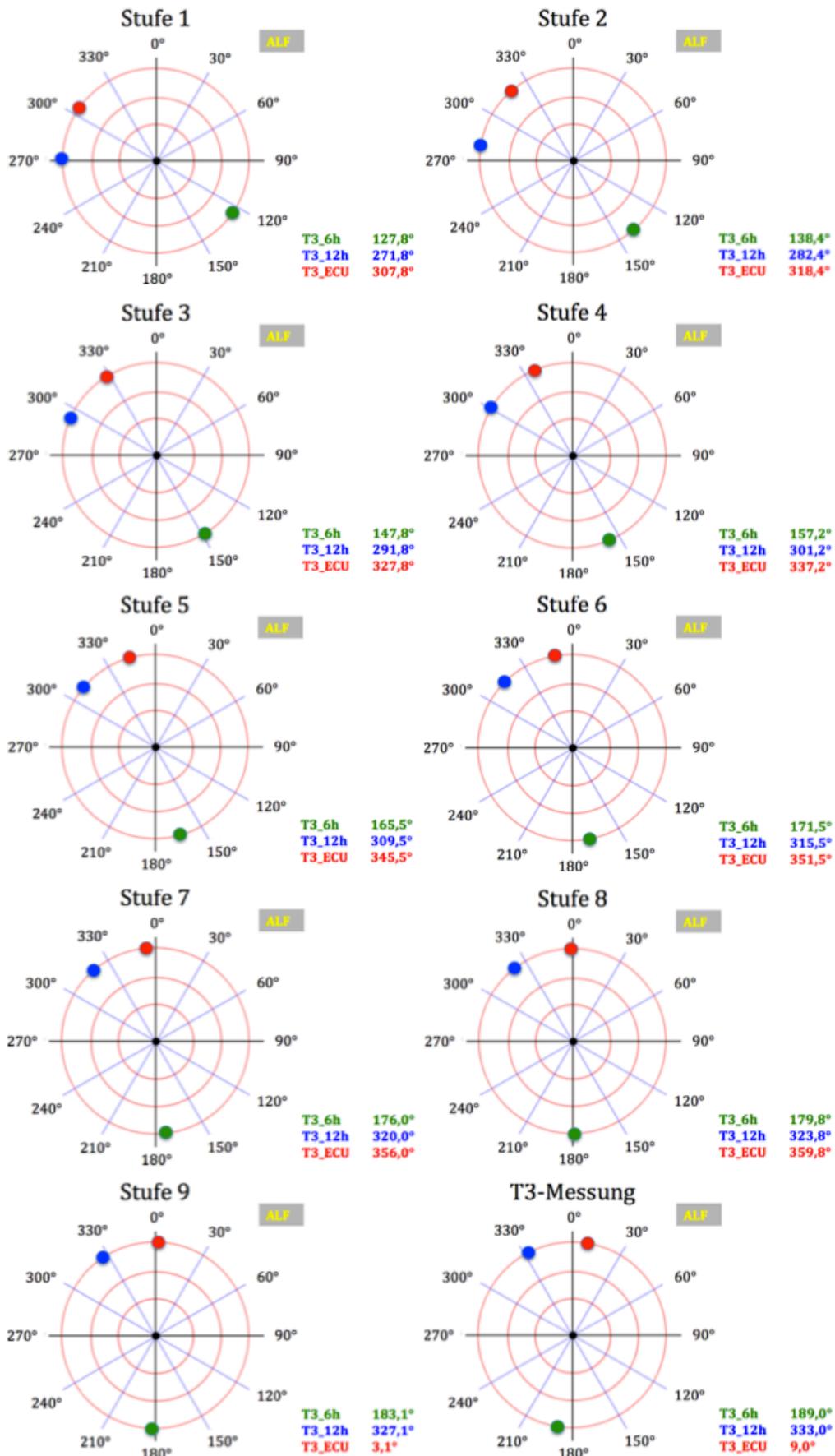


Abbildung 3.5.5 Strömungsversatz im Standardkoordinatensystem (ALF)

3.6 Rundheit des HDV-Gehäuses



Abbildung 3.6.1 Rundheitsmessung des HDV-Gehäuses

Zentrale Aufgabe dieser Ausarbeitung ist die Untersuchung des Einflusses unrunder Verdichtergehäuse auf das Betriebsverhalten von Verkehrsflugzeugen. Um eine optimale Verdichtung zu erzielen, werden hohe Anforderungen an die Qualität des Hochdruckverdichters gestellt. Für einen idealen Spalt zwischen Laufschaufel und HDV-Gehäusewandung (Abbildung 3.6.2) wird die Rundheit des geschliffenen HDV-Gehäuses vermessen (Abbildung 3.6.1). Auch wenn das Schliffbild des Statorgehäuses innerhalb der gegebenen Toleranzen liegt, ist der lokal auftretende Einfluss von leicht unrunder Verdichtergehäusen nicht zu vernachlässigen und wird im Rahmen dieser Ausarbeitung untersucht.

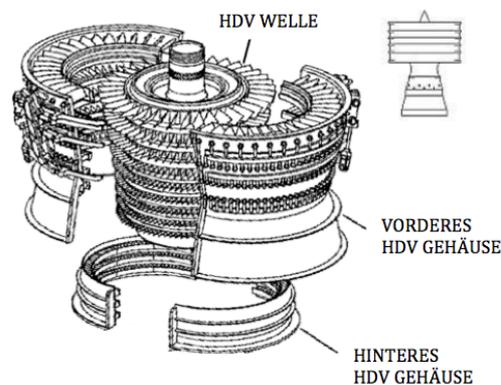


Abbildung 3.6.2 Module des Hochdruckverdichters [ESM]

Die Rundheit des Gehäuses wird durch eine vollautomatische 3-Koordinaten-Messmaschine mit einer 72-Punktemessung in jeder einzelnen Stufe in einem vollklimatisierten Messraum (Abbildung 3.6.1) aufgezeichnet. Hierbei wird in jeder Stufe lediglich der Bereich vermessen, in dem sich später die Laufschaufeln befinden werden. (Abbildung 3.6.3).

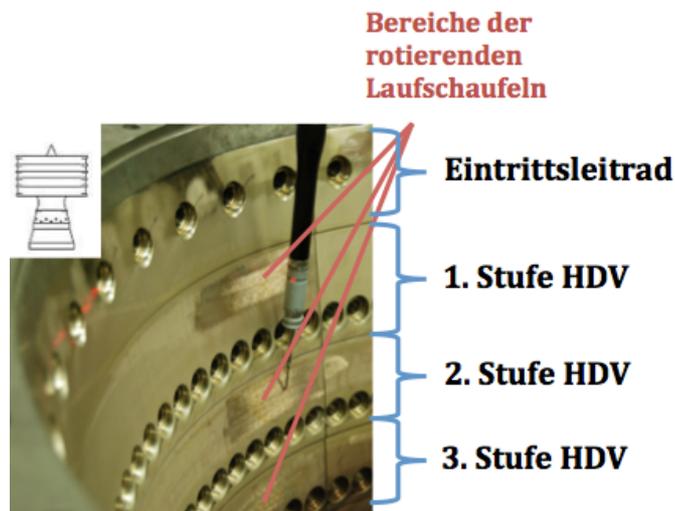


Abbildung 3.6.3 Vermessung der Rundheit des geschliffenen HDV-Gehäuses

Für jede Stufe wertet die Messmaschine die entnommenen Messpunkte aus und plottet fertige Rundheitsdiagramme mit den jeweiligen Toleranzangaben, der Rundheit, und der Standardabweichung aus. Für den Schliff der Laufschaufeln am HSG ist der minimale Radius des Gehäuses an der jeweiligen Stufe besonders wichtig. Ausgehend von diesem Maß werden die Laufschaufeln der Hochdruckwelle solange zurechtgeschliffen, bis sich der festgelegte HSG-Spalt (Tabelle 3.4.1) einstellt.

Koordinatentransformation

Das Koordinatensystem der Rundheitsdiagramme entspricht nicht dem in der Triebwerkstechnik gängigen Koordinatensystem. Um eine direkte Vergleichbarkeit der verschiedenen Einflüsse zu gewährleisten, wird in Abbildung 3.6.4 und 3.6.5 eine Koordinatentransformation durchgeführt. Zum Verständnis dienen die drei Messpunkte:

| | |
|------------------|--------|
| Roter Messpunkt | T3_ECU |
| Grüner Messpunkt | T3_6h |
| Blauer Messpunkt | T3_12h |

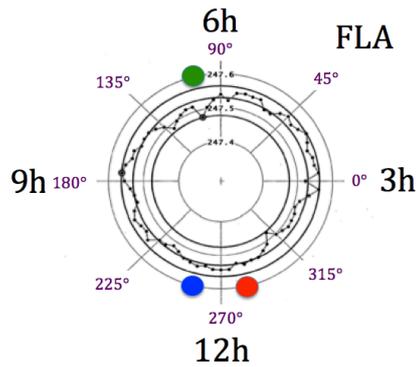


Abbildung 3.6.4 Koordinatensystem des Rundheitsdiagramms [LHT]

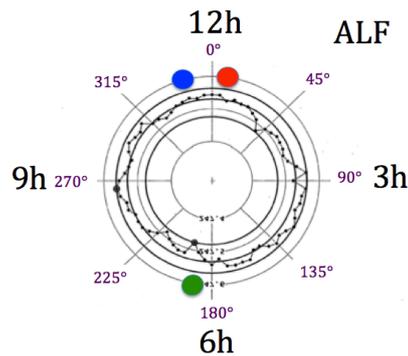
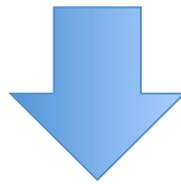


Abbildung 3.6.5 Koordinatensystem des transformierten Rundheitsdiagramms [LHT]

Die zugehörige Formel für die einfache Transformation von einzelnen lokalen Punkten in das übliche Koordinatensystem (Kapitel 2.10) lässt sich wie folgt vereinfachen:

$$Winkel_{ALF} = Winkel_{Rundheitsdiagramm} + 90^\circ$$

Formel 3.6.1 Koordinatentransformation

Anwendung des Winkerversatzes des HDV auf die Rundheitsdiagramme

Folgende Daten sind bekannt:

- Rundheitsdiagramm jeder einzelnen Stufe des HDV
- Positionen der T3-Messsonden hinter dem HDV
- Koordinatentransformation der Rundheitsdiagramme
- Strömungsversatz jeder einzelnen Stufe des HDV

Wird das Rundheitsdiagramm entsprechend transformiert und mit der Erkenntnis des Strömungsversatzes aus Abbildung 3.3.5 der einflussnehmende Rundheitsbereich lokalisiert (Abbildung 3.6.7), kann der zusätzliche Spalt dem Rundheitsdiagramm entnommen werden.

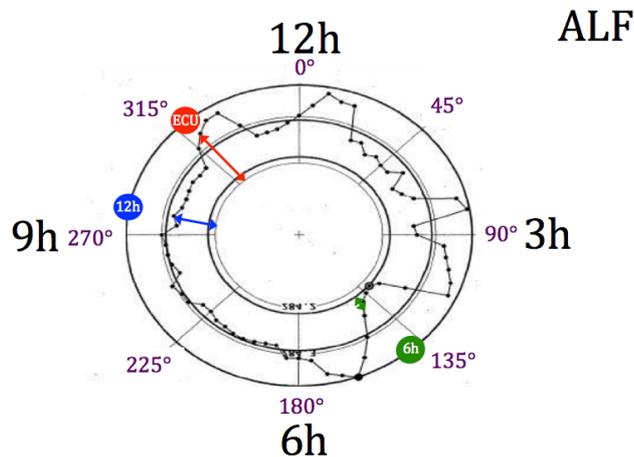


Abbildung 3.6.6 Rundheitsdiagramm 2. Stufe HDV (ALF) [LHT]

Ausgehend vom minimalen Radius des Rundheitsdiagramms, welcher für den HSG-Schliff verwendet wird, wird der lokale zusätzliche Spalt für jede Stufe (Tabelle 3.6.1) einzeln abgelesen und dem HSG-Spalt hinzugefügt. Diese Daten sind für die spätere Auswertung sehr interessant. Es ist nebenbei zu untersuchen, ob die Drallwirkung wirklich einen erfassbaren Effekt aufweist.

Tabelle 3.6.1 Winkel des Strömungsversatzes in 2. Stufe des HDV

| Messsonde | Winkel (ALF) [deg] | Spalt (Rundheit) [mm] |
|-----------|--------------------|-----------------------|
| T3_ECU | 318,4° | 0,17 |
| T3_6h | 138,4 | 0,02 |
| T3_12h | 282,4 | 0,08 |

3.7 Rotor-Exzentrizität der N2-Welle

Die horizontale Rotor-Exzentrizität der Hochdruckwelle hat ebenso einen Einfluss auf den Tipspalt im Hochdruckverdichter, welcher in der Hochdruckturbine auf Grund der Lagerung verstärkt wird.

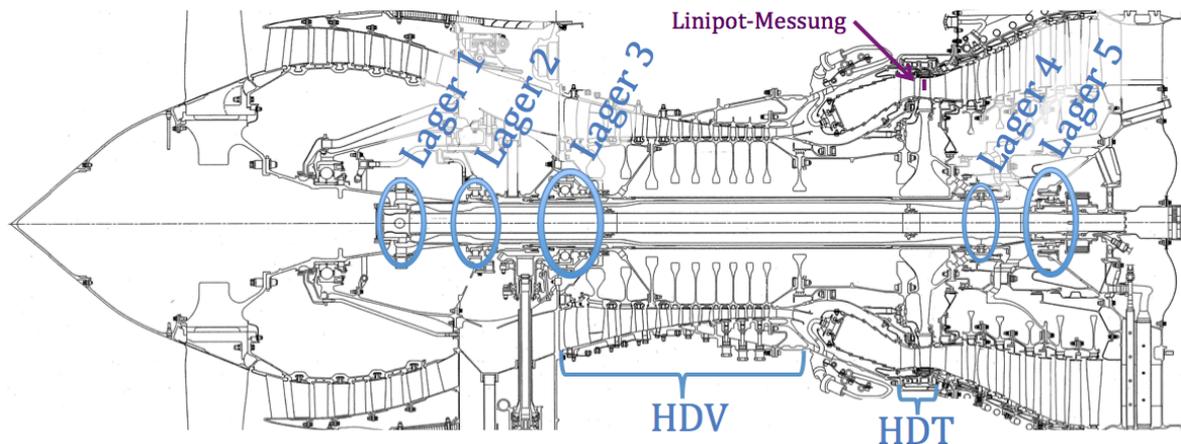


Abbildung 3.7.1 Anordnung der Lager mit Position der Linipot-Messung [ESM]

Die horizontale Rotor-Exzentrizität der Hochdruckwelle wird im zusammengebauten Triebwerk in horizontaler Lage in der Hochdruckturbine bestimmt. Entscheidend für diese Wahl ist die Anordnung der Lager und somit die Ausrichtung und Durchbiegung der Hochdruckwelle.

Für die Lagerung der Hochdruckwelle sind Lager 3 (Festlager) und Lager 4 vorgesehen, wobei Lager 4 die Hochdruckwelle auf der Niederdruckwelle lagert. Die Niederdruckwelle wird hingegen durch das ölgedämpfte Lager 5 gelagert. Somit wirkt sich das ölgedämpfte Lager 5 sowohl auf die Niederdruckwelle als auch auf die Hochdruckwelle aus (Abbildung 3.7.1).

Durch Lager 3 (Festlager) wird die radiale Verschiebung des HDV in den vorderen Stufen ausgeschlossen, da die feste Einspannung durch dieses Lager kaum Spielraum zulässt.

Lager 5 hingegen ist ein ölgedämpftes Lager. Erst im Betrieb sorgt der Öldruck für die mittige Ausrichtung der Nieder- und Hochdruckwelle, indem der hintere Teil der Niederdruckwelle und die hierauf gelagerte Hochdruckwelle wegen des Öldrucks nach oben (Richtung 12h-Position) wandert. Im hinteren Bereich des Lager 5 ist hingegen die

Verschiebung am größten. Da die Linipotmessung eine kalte Messung ist, muss berücksichtigt werden, dass die Rotor-Exzentrizität nach unten (Richtung 6h-Position) versetzt ist. Durch die Positionierungsbuchse am Lager 5 lässt sich ein gezieltes Offset einstellen, damit im Flugbetrieb die Wellen mittig ausgerichtet werden. Ob die Hochdruckwelle im Flugbetrieb nun tatsächlich mittig liegt kann nicht festgestellt werden. Lediglich eine schätzungsweise Näherung lässt sich einstellen.

Weil die Rotor-Exzentrizität der Hochdruckwelle in Nähe des ölgedämpften Lagers die maximale Auslenkung besitzt, wird auf dem Laufrad der Hochdruck turbine die Linipotsonde montiert (Abbildung 3.7.2).

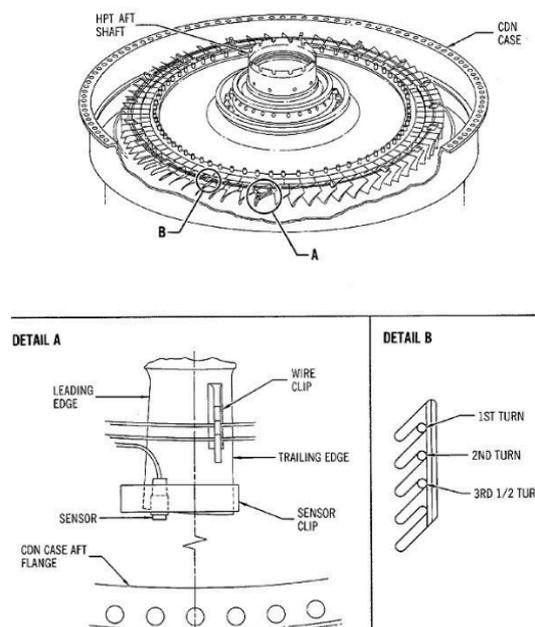


Abbildung 3.7.2 Fixierung der Linipot-Sonde [ESM]

Während der Messung wird sowohl der Abstand zum Gehäuse als auch die jeweilige Umfangsposition als Winkelangabe festgehalten. Somit lässt sich treffend eine Aussage über die Exzentrizität im hinteren Bereich der Hochdruckwelle schließen.

Beim Auslesen der geplotteten Linipotmessung darf folgende Überlegung nicht fehlen:

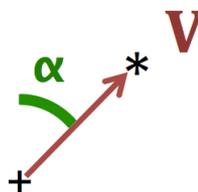
Da die Messsonde auf einer Laufschaukel fixiert wird und somit der gemessene Abstand zum Leitradgehäuse aus der Sicht des Laufrads aufgezeichnet wird, entspricht das auf dem Ergebnisblatt vermerkte "Zentrum des außermittigen Kreises" dem Mittelpunkt des HPT-Gehäuses und nicht der Hochdruckwelle.

Das bedeutet, dass der Verschiebungsvektor den Mittelpunkt des HDT-Gehäuses anzeigt. Der Verschiebungsvektor der Hochdruckwelle zeigt folglich in die entgegengesetzte Richtung.

Anwendung des Winkelpersatzes des HDV auf die Exzentrizität der Hochdruckwelle

Der Spalt zwischen Laufschaufel und HDV-Gehäuse wird auch durch die Rotor-Exzentrizität beeinflusst. Ebenfalls wird hier der Verdichterversatz berücksichtigt.

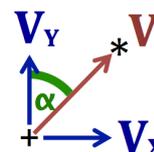
Die Linipot-Messung stellt den Verschiebungsvektor des HDT-Gehäuses zum HDT-Rotor dar. Mit anderen Worten zeigt dieser Verschiebungsvektor genau die Richtung der Zunahme des Spaltes an. Dieser Verschiebungsvektor ist durch den Winkel „ α “ und den Betrag „ V “ vollständig definiert.



Um den Spalteinfluss an den jeweiligen Positionen zu beschreiben, wird der Verschiebungsvektor im ersten Schritt in die X- und Y-Komponente zerlegt.

$$\begin{aligned} V_X &= V \cdot \sin \alpha \\ V_Y &= V \cdot \cos \alpha \end{aligned}$$

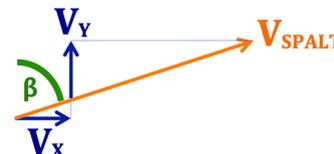
Formel 3.7.1 Komponentenzerlegung (Exzentrizität)



Anschließend werden diese Komponenten mit dem aus dem Verdichterdrall stammenden Winkel „ β “ vektoriell addiert, um einen näherungsweise korrekten Tipspalt zu berechnen. Tatsächlich wird hier der Verschiebungsvektor der Messposition berechnet.

$$V_{SPALT} = V_X \cdot \sin \beta + V_Y \cdot \cos \beta$$

Formel 3.7.2 Spalt aus Exzentrizität



Dieser Spalt entspricht nicht dem tatsächlichen zusätzlichen Spalt als Folge der Rotor-Exzentrizität, sondern ist nur eine gute Annäherung. Weiterhin sollte noch berücksichtigt werden, dass der Spalt in den vorderen Stufen der Hochdruckwelle (Lager 3 – Festlager) vernachlässigbar klein ist und erst in den hinteren Stufen der Hochdruckwelle (Lager 5 – ölgedämpftes Lager) an Einfluss zunimmt.

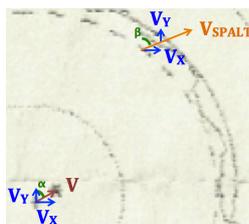


Abbildung 3.7.3 Ausschnitt einer Linipot-Messung [LHT]

3.8 Streuung der Verdichteraustrittstemperatur

Die Streuung der Verdichteraustrittstemperatur wird durch den unregelmäßigen Spalt zwischen HDV-Laufrad und HDV-Gehäuse beeinflusst. Dieser entsteht durch etwaige Unrunden im HDV-Gehäuse und der nicht mittigen Rotor-Exzentrizität der Hochdruckwelle. Dabei wird die T3-Totaltemperatur an drei Positionen gemessen, die der Tabelle 3.8.1 und der Abbildung 3.8.1 zu entnehmen ist.

Tabelle 3.8.1 Positionen der T3-Temperaturmesssonden [ESM]

| Messsonde | Positionierung (ALF) |
|-----------|----------------------|
| T3_ECU | 9° |
| T3_6h | 189° |
| T3_12h | 333° |

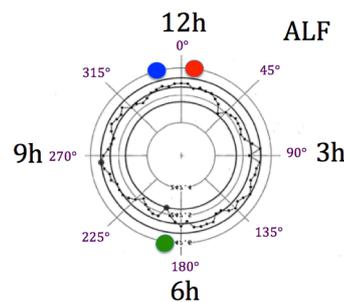


Abbildung 3.8.1 Positionen der T3-Temperaturmesssonden [LHT]

Um die Streuung der Verdichteraustrittstemperatur triebwerksübergreifend bewerten und vergleichen zu können, werden die relativen Totaltemperaturen jeder Sonde nach den Formeln 3.8.1 berechnet. Der Einfluss der 6h-Sonde wird dabei nicht für die durchschnittliche Totaltemperatur hinzugezogen, da die T3_6h-Totaltemperatur stark von der Rotor-Exzentrizität abhängig ist. Ein weiterer Vorteil ist, dass bei unterschiedlichen Betriebspunkten die relativen Totaltemperaturen verfügbar und ähnlich sind (Diagramm 3.3.1).

| | | |
|--|--|--|
| $T3_{ECU_rel} = \frac{T3_{ECU}}{T3_{ECU} + T3_{12h}}$ | $T3_{12h_rel} = \frac{T3_{12h}}{T3_{ECU} + T3_{12h}}$ | $T3_{6h_rel} = \frac{T3_{6h}}{T3_{ECU} + T3_{12h}}$ |
|--|--|--|

Formel 3.8.1 Berechnung der relativen Temperaturen am Austritt des HDV

3.9 Ventilkappenstellung der HPTACC

Alle für das Regelungssystem der aktiven Spaltkontrolle des HDT-Gehäuses relevanten Parameter sind der Tabelle 3.9.1 zu entnehmen.

| Parameter | Bezeichnung | Beschreibung |
|--------------------|-------------------------------------|--|
| Eingangsparameter | N_2 | Drehzahl der Hochdruckwelle |
| | P_0 | Umgebungsdruck |
| | T_{12} | Totaltemperatur am Eintritt des Fans |
| | T_{25} | Totaltemperatur am Eintritt des Hochdruckverdichters |
| | T_3 | Totaltemperatur am Austritt des Hochdruckverdichters |
| Regelungsparameter | HPTC | Ventilkappenstellung des HPTACC [%] |
| Zielparame-ter | T_C | Gehäusetemperatur der Hochdruckturbine |
| | $T_{C_{RingRat}} = \frac{T_C}{T_3}$ | berechnetes Temperaturverhältnis |

Tabelle 3.9.1 Informationsfluss des HPTACC-Regelungssystems [LHT Training]

Die entsprechende Reaktion des Regelungssystems variiert lediglich das Mischverhältnis der Zapfluft aus vierter und neunter Stufe des Hochdruckverdichters durch die Ventilkappenstellung des HPTACC Regelungssystems. An den beiden Positionen der Zapfluftentnahme (Abbildung 2.9.1) herrschen durch den jeweiligen Fortschritt der Verdichtung unterschiedliche Druck- und somit auch Temperaturniveaus. Dieser Temperaturunterschied zwischen der vierten und neunten Stufe ist erwünscht, denn nur durch ein variables Mischverhältnis lässt sich die optimale Kühl- bzw. Gehäusetemperatur stufenlos regeln. Möglich macht dies eine mechanische Kolbenbewegung, die über eine Hebelmechanik beide Ventilkappen steuert und somit die Luftmenge und hierdurch das Mischverhältnis verändert. Diese Ventilkappenstellung wird prozentual geregelt. In Diagramm 3.9.1 kann abgelesen werden, inwieweit sich diese auf die Durchflussfläche der jeweiligen Stufe auswirkt.

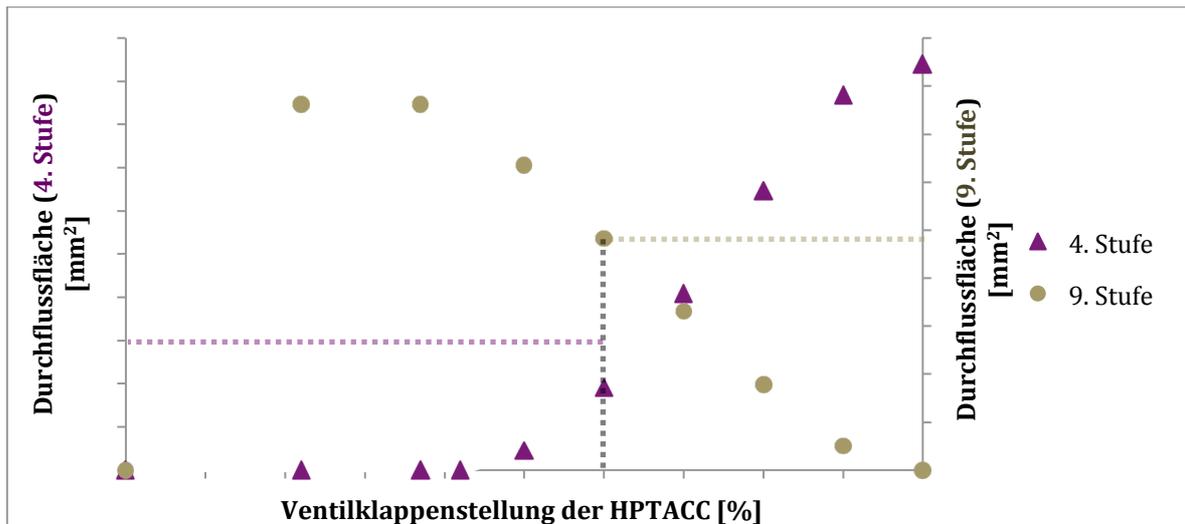


Diagramm 3.9.1 Ventilklappenstellung des HPTACC [LHT]

An den beiden Positionen der Zapfluftentnahme ist die Totaltemperatur, der Totaldruck und der Massenstrom nicht bekannt. Es wird soweit reguliert bzw. die Ventilklappenposition verstellt, bis eine bestimmte HDT-Gehäusetemperatur erreicht wird. Bei maximaler HDT-Gehäusekühlung fährt die Ventilklappenstellung der aktiven Spaltkontrolle auf 100% und bezieht somit die Zapfluft nur aus der vierten Stufe des HDV. Soll eine höhere HDT-Gehäusetemperatur erreicht werden, fährt die Ventilklappenstellung prozentual runter und mischt somit die Kühlluft mit wesentlich wärmerer Zapfluft der neunten Stufe des HDV (Abbildung 2.9.1).

Abbildung 3.9.2 zeigt den sichtbaren Teil des Regelungssystems am Triebwerk. Da das Regelungssystem in Flugrichtung auf der rechten Seite montiert ist, ist in diesem Kapitel die Ausrichtung der Blickrichtung hierzu angepasst. Abbildung 3.9.1 dient zur Orientierung der Abbildung 3.9.2, welche das sichtbare Regelungssystem direkt am CFM56-5C4 zeigt.

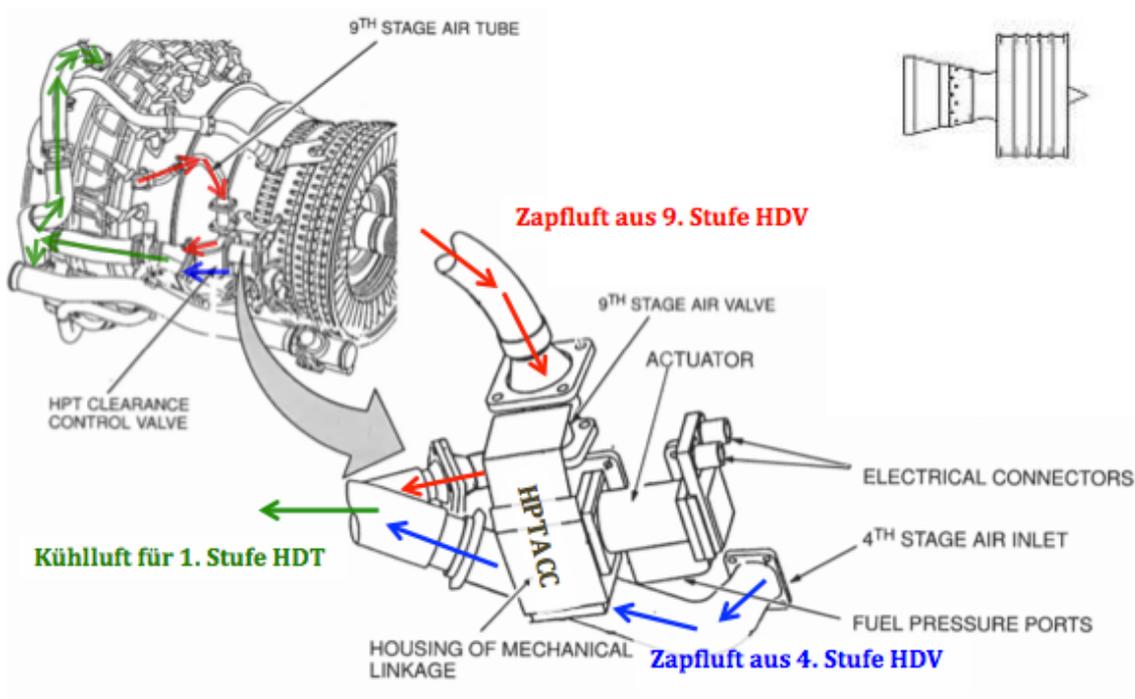


Abbildung 3.9.1 Zapfluftentnahme und Kühlluftzufuhr für HPTACC [ESM]

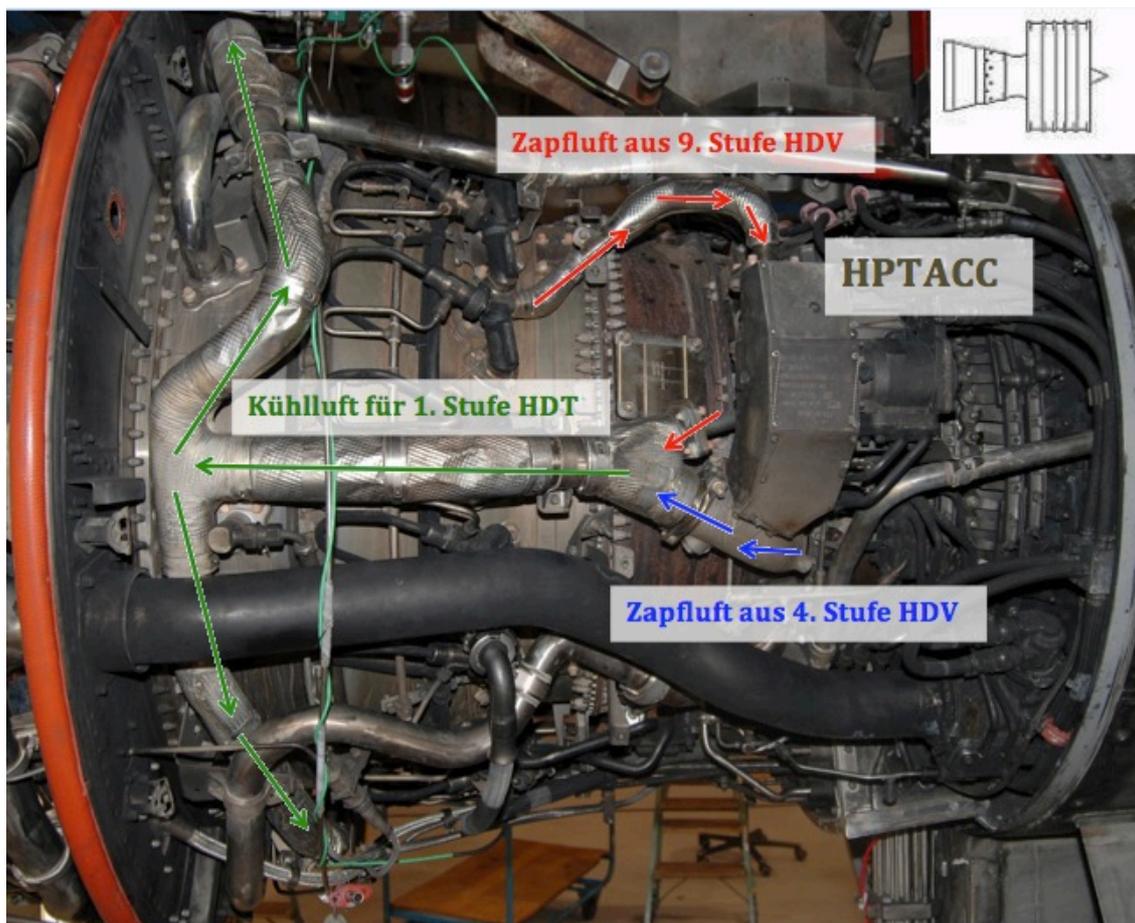


Abbildung 3.9.2 Zapfluftentnahme und Kühlluftzufuhr der HPTACC am CFM56-5C4

4 Auswertung

4.1 Rundheit mit Verdichterwirkungsgrad

Im ersten Teil der Auswertung wird die Rundheit des HDV-Gehäuses (Kapitel 3.6) mit dem jeweiligen Verdichterwirkungsgrad untersucht.

Hierbei steht aus Berechnungen der Kreisprozessanalyse sowohl der isentrope als auch der polytrope Verdichterwirkungsgrad zur Verfügung. Da diese jedoch stark vom jeweiligen Druckniveau und der Drehzahl der Hochdruckwelle abhängig sind, kann ein einfacher triebwerksübergreifender Vergleich durch eine konventionelle Analyse (direkter Vergleich) nicht durchgeführt werden. Hierfür muss der Verdichterwirkungsgrad auf einheitliche Randbedingungen korrigiert werden. Unter anderem wird dabei die Drehzahl der Hochdruckwelle und das herrschende Druckniveau des HDV für alle Triebwerke normiert. Durch diese Korrektur der Randbedingungen resultiert ebenfalls eine Korrektur des Verdichterwirkungsgrades, so dass die nun normierten Randbedingungen des korrigierten Verdichterwirkungsgrades im folgenden Schritt der Rundheit des HDV-Gehäuses gegenübergestellt werden können.

Die Rundheit des HDV-Gehäuses wird in drei Bereiche unterteilt (Tabelle 4.2.1), um sowohl den Einfluss des gesamten Hochdruckverdichters als auch den Einfluss einzelner Bereiche mit dem korrigierten Verdichterwirkungsgrad zu untersuchen. Hierfür wird die gemittelte Rundheitsabweichung der jeweiligen Bereiche erfasst und auf der folgenden Seite in vier Diagrammen dem zuzuordnenden korrigierten Verdichterwirkungsgrad gegenübergestellt. Dabei entspricht jedes Diagramm einem HDV-Bereich. Die Einteilung der HDV-Bereiche werden nachfolgend in Kapitel 4.2 beschrieben und in Tabelle 4.2.1 definiert.

In der Regel sollte die Rundheit des HDV-Gehäuses einen Einfluss auf den korrigierten Verdichterwirkungsgrad haben. Je mehr die Rundheit des Hochdruckverdichters abweicht, desto schlechter (niedriger) sollte der korrigierte Verdichterwirkungsgrad sein. Dieser Aspekt wird im Folgenden untersucht.

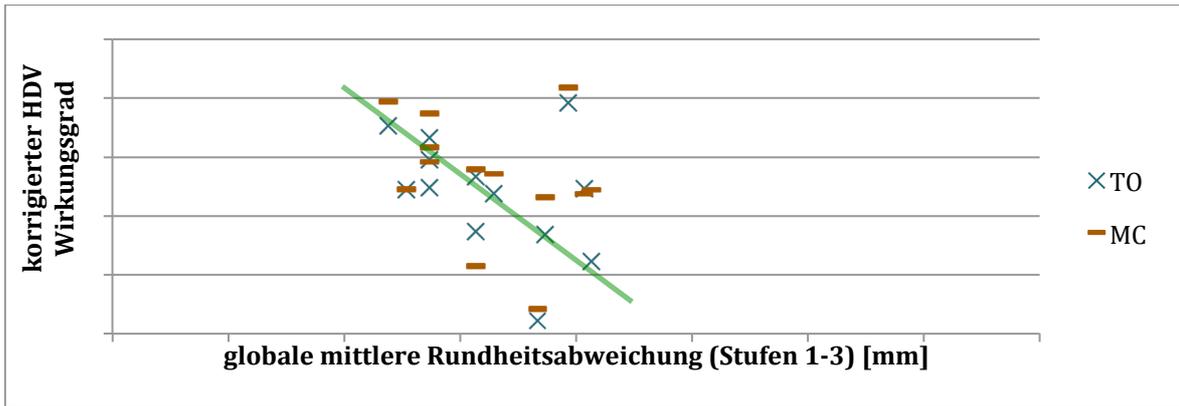


Diagramm 4.1.1 korrigierter Verdichterwirkungsgrad über Rundheit (Stufen 1-3)

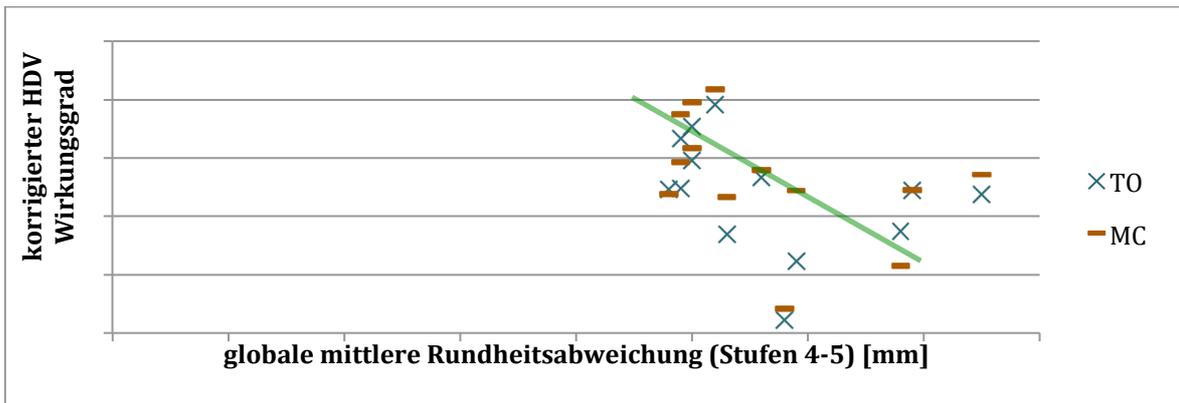


Diagramm 4.1.2 korrigierter Verdichterwirkungsgrad über Rundheit (Stufen 4-5)

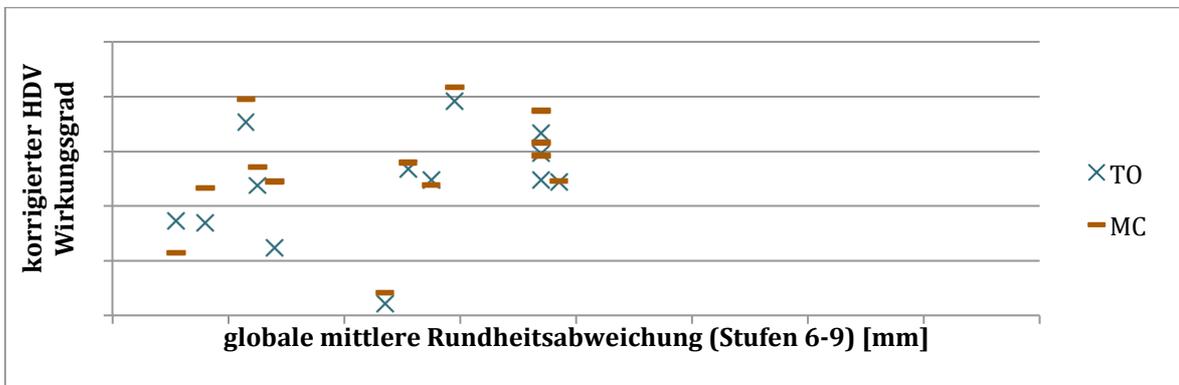


Diagramm 4.1.3 korrigierter Verdichterwirkungsgrad über Rundheit (Stufen 6-9)

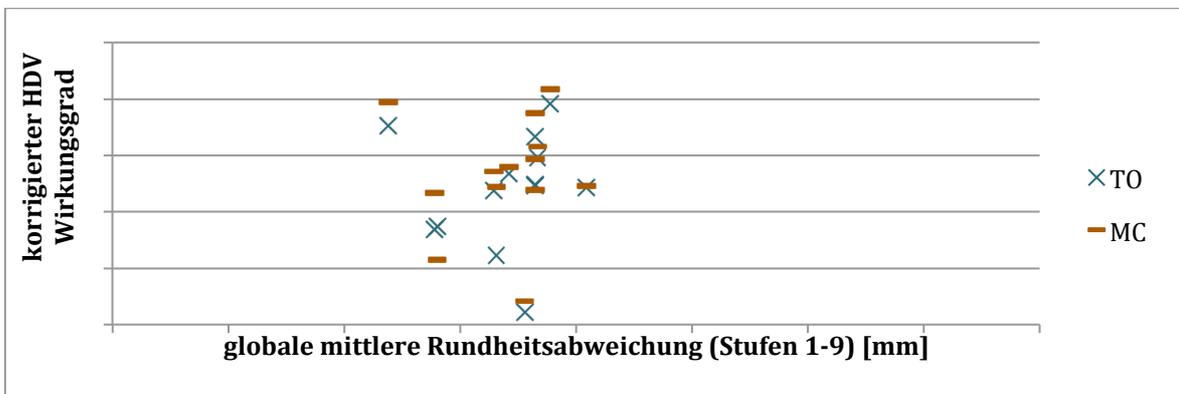


Diagramm 4.1.4 korrigierter Verdichterwirkungsgrad über Rundheit (Stufen 1-9)

Für alle vier Diagramme gilt, dass für den Flugfall „MC“ der korrigierte Verdichterwirkungsgrad höher ist, als für den Flugfall „TO“. Wird der nicht korrigierte isentrope und polytrope Verdichterwirkungsgrad betrachtet, so ist dieser für den Flugfall „TO“ höher. Das niedrigere Druckniveau und die niedrigere Drehzahl des Flugfalls „MC“ werden beim Korrigieren angehoben, um mit dem Flugfall „TO“ konkurrieren zu können. Durch diese Korrektur zum höheren Druckniveau und zur höheren Drehzahl nimmt ebenso der korrigierte Verdichterwirkungsgrad des Flugfalls „MC“ zu und übersteigt sogar den Flugfall „TO“.

Den ersten beiden Diagrammen 4.1.1 und 4.1.2 ist zu entnehmen, dass sowohl im vorderen als auch im mittleren Bereich des Hochdruckverdichters die Punktwolken dem linearen Trend folgen, der zuvor angenommen wurde. Mit steigender mittlerer Rundheitsabweichung nimmt der korrigierte Verdichterwirkungsgrad ab, da die Strömungsverluste größer werden (Kapitel 2.6). Im hinteren Bereich des Hochdruckverdichters (Diagramm 4.1.3) ist kein eindeutiger Trend erkennbar. Wird nun die gemittelte Rundheitsabweichung des gesamten Hochdruckverdichters in Diagramm 4.1.4 betrachtet, verfälscht der große Einfluss der hinteren Stufen (Diagramm 4.1.3) den Trend, so dass auch dem Gesamtverdichter kein logischer Trend zu entnehmen ist.

Diagramm 4.1.3 lässt auf die Annahme schließen, dass der Verdichterwirkungsgrad in den hinteren Stufen des Hochdruckverdichters durch einen anderen Faktor beeinflusst wird. Dem Kapitel 3.7 ist zu entnehmen, dass die Rotor-Exzentrizität der Hochdruckwelle in den hinteren Stufen des Hochdruckverdichters an Einfluss gewinnt. Es gilt nun zu untersuchen, ob der korrigierte Verdichterwirkungsgrad in den hinteren Stufen des Hochdruckverdichters durch die Rotor-Exzentrizität beeinflusst wird. Sollte ein Zusammenhang bestehen, müsste sich bei einer größer werdenden Exzentrizität der Hochdruckwelle eine Abnahme des Verdichterwirkungsgrades einstellen. Diagramm 4.1.5 befasst sich mit diesem Zusammenhang.

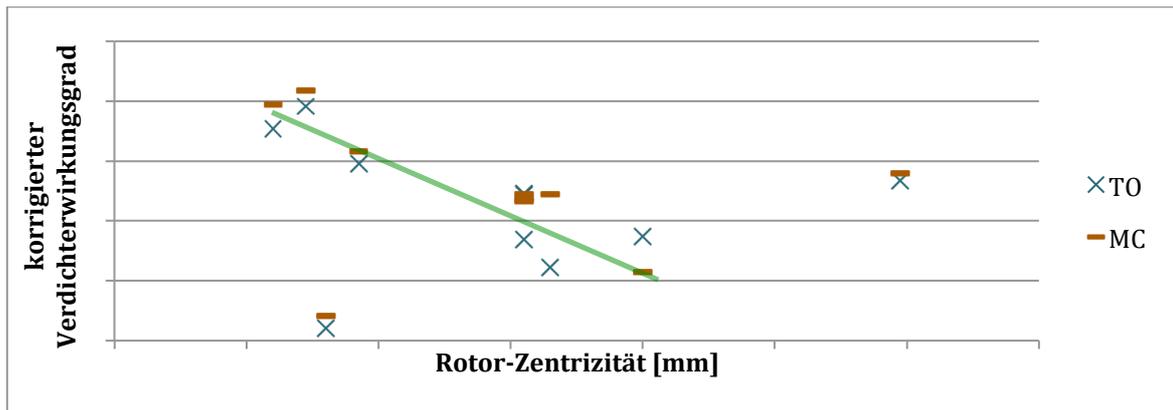


Diagramm 4.1.5 Verdichterwirkungsgrad über Rotor-Exzentrizität der N2-Welle

Diagramm 4.1.5 bestätigt diese Annahme. Tatsächlich nimmt der korrigierte Verdichterwirkungsgrad ab, wenn die Exzentrizität der Hochdruckwelle zunimmt. In den hinteren Stufen des HDV ist somit bezogen auf den Verdichterwirkungsgrad der Einfluss der Rotor-Exzentrizität der Hochdruckwelle höher als die mittlere Rundheitsabweichung des HDV-Gehäuses. Die Rotor-Exzentrizität der Hochdruckwelle hat ihren größten Einfluss in den hinteren Stufen des Hochdruckverdichters, da hier die Durchbiegung der Hochdruckwelle am größten ist.

Hiermit ist der Einfluss des gesamten Hochdruckverdichters auf den korrigierten Verdichterwirkungsgrad erklärt. In den vorderen fünf Stufen des Hochdruckverdichters wird der Verdichterwirkungsgrad durch die mittlere Rundheit des HDV-Gehäuses maßgeblich beeinflusst. In den hinteren Stufen hingegen dominiert der Einfluss der Rotor-Exzentrizität der Hochdruckwelle.

4.2 Rundheit und Rotor-Exzentrizität mit der T3-Streuung

Die Streuung der Austrittstemperatur des Hochdruckverdichters stellt sich durch die Kombination aller einflussnehmenden Faktoren ein. Hierzu zählt sowohl der Einfluss des lokalen Tipspaltes durch die Rundheit des HDV-Gehäuses (Kapitel 3.6) als auch durch die Rotor-Exzentrizität der Hochdruckwelle (Kapitel 3.7). Diese beiden Faktoren werden im Folgenden getrennt voneinander mit der Streuung der Verdichteraustrittstemperatur (Kapitel 3.8) betrachtet. Dabei wird sowohl die drallfreie als auch die drallbehaftete Strömung untersucht (Kapitel 3.5).

4.2.1 Streuung der Verdichteraustrittstemperatur

Um die Streuung der Verdichteraustrittstemperatur zu verstehen, wird im ersten Ansatz eine konventionelle Analyse durchgeführt, indem die T3-Totaltemperaturen mit den Formeln 3.8.1 für das Diagramm 4.2.1 aufbereitet werden.

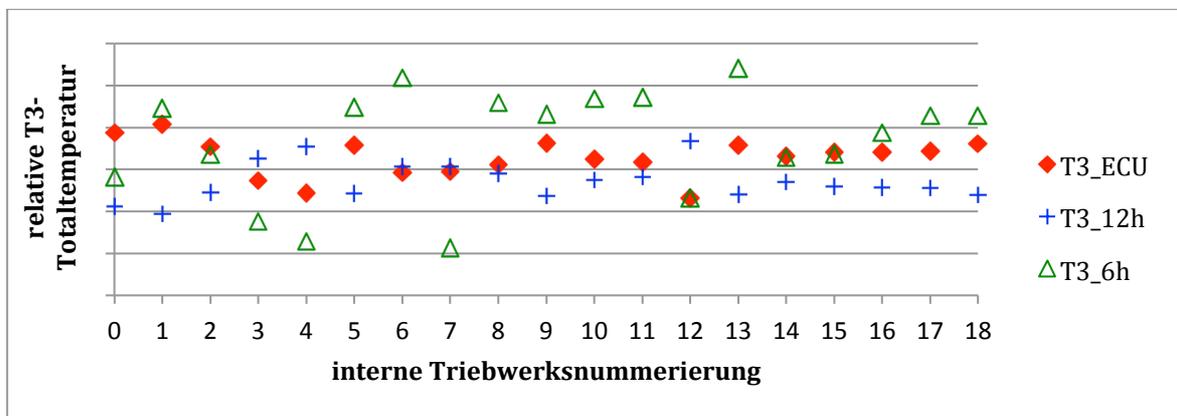


Diagramm 4.2.1 relative T3-Totaltemperaturen für den Flugfall TO

Da die relativen Totaltemperaturen auf den Mittelwert aus T3_ECU und T3_12h bezogen werden, sind die Messpunkte der T3_ECU und T3_12h für jeden Motor an der horizontalen Achse ($T_{rel}=1,000$) gespiegelt. Lediglich die Totaltemperatur T3_6h weist ein hiervon entkoppeltes Temperaturniveau auf. Etwa 60% der getesteten Motoren haben ihre

höchste T3-Totaltemperatur an der 6h-Position. Diese Aussage ist mit der Linipotmessung zu erklären, auf die später eingegangen wird.

Die T3-Totaltemperaturstreuung, welche für dieses Kapitel von entscheidendem Interesse ist, wird aus der maximalen Differenz der drei relativen T3-Totaltemperaturen aus dem vorangegangenen Diagramm 4.2.1 ermittelt. In Diagramm 4.2.2 wird für jeden Motor diese prozentuale T3-Streuung angegeben.

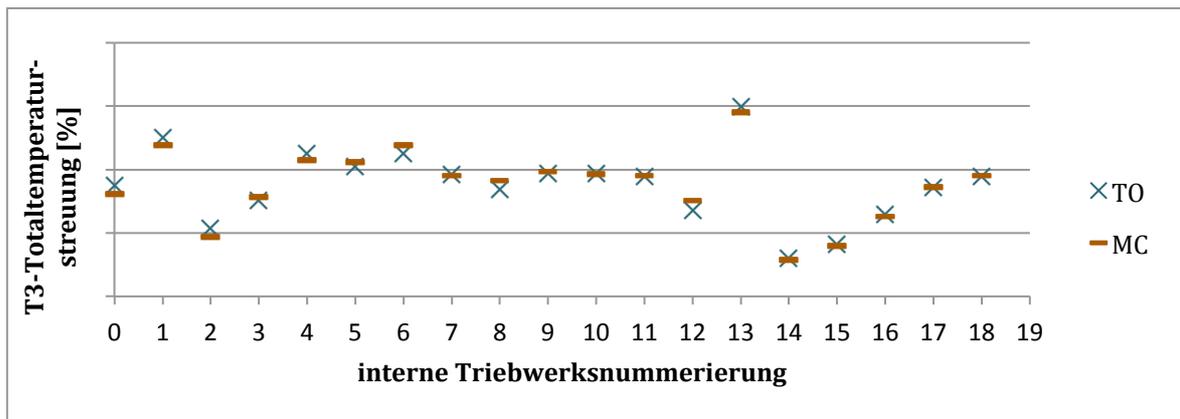


Diagramm 4.2.2 T3-Totaltemperaturstreuung

Zu erkennen ist eine mittlere T₃-Totaltemperaturstreuung von X Prozent. Bei realistischen Verdichteraustrittstemperaturen von 850 Kelvin (im Standfall), sorgt schon die Streuung von einem Prozent für erhebliche Temperaturdifferenz von X Kelvin. Nun gilt es diese Abweichungen durch die beiden Hauptfaktoren zu erklären.

4.2.2 Rundheit des HDV-Gehäuses

Wird nun die Streuung der Verdichteraustrittstemperatur mit der Rundheit des HDV-Gehäuses untersucht, ist eine durchdachte Vorgehensweise von besonderem Interesse. Im Folgenden wird der Einfluss der Rundheit zuerst global betrachtet und wird anschließend immer lokaler, bis zum Schluss der Strömungsversatz im HDV mit in die Gegenüberstellung einfließt.

Globale Rundheitsabweichung

Im Folgenden wird die Rundheit des HDV-Gehäuses global betrachtet, indem jede Verdichterstufe durch nur eine Rundheitsabweichung beschrieben wird, welche den Rundheitsdiagrammen entnommen wird. Wird für jede Stufe die globale Rundheitsabweichung über alle vermessenen HDV-Gehäuse gemittelt, entsteht Diagramm 4.2.3.

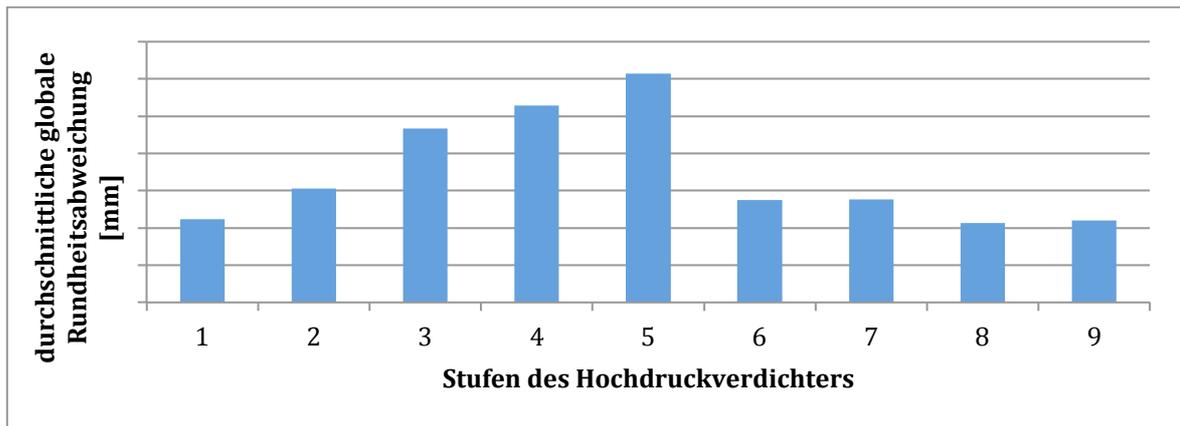


Diagramm 4.2.3 durchschnittliche Rundheitsabweichung für jede HDV-Stufe

Aus Diagramm 4.2.3 ist ersichtlich, dass der mittlere Bereich des HDV-Gehäuses am größten und die letzten vier Stufen mit besonderer Genauigkeit geschliffen werden. Hierbei besitzen die letzten beiden Stufen im Durchschnitt eine mittlere Rundheitsabweichung von nur X mm. Bezogen auf den Radius des HDV-Gehäuses ist diese prozentuale minimale Rundheitsabweichung dennoch nicht zu vernachlässigen.

Um eine exakte Untersuchung zu ermöglichen, wird das HDV-Gehäuse abhängig von der durchschnittlichen Rundheitsabweichung aus Diagramm 4.2.3 in drei Bereiche eingeteilt. Diese sind in Tabelle 4.2.1 definiert und werden sowohl einzeln als auch zusammen untersucht.

Tabelle 4.2.1 Einteilung des Hochdruckverdichters in drei Bereiche

| Bereich des Hochdruckverdichters | zugehörige Stufen |
|----------------------------------|-------------------|
| Gesamter HDV | 1-9 |
| Vorderer HDV | 1-3 |
| Mittlerer HDV | 4-5 |
| Hinterer HDV | 6-9 |

Ausgehend vom gesamten Hochdruckverdichter wird in Diagramm 4.2.4 die Streuung der T₃-Totaltemperatur über die gemittelte Rundheit des gesamten Hochdruckverdichters (Stufen 1-9) aufgetragen.

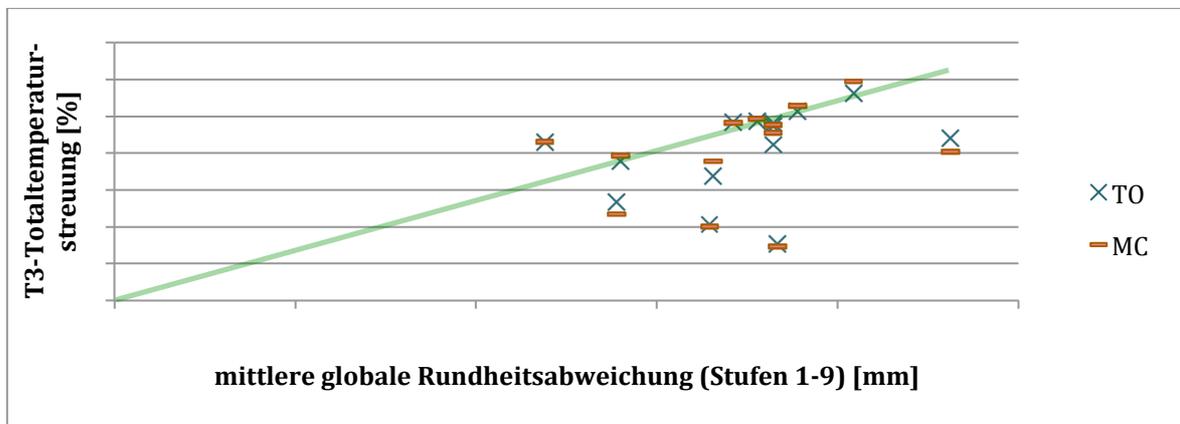


Diagramm 4.2.4 Einfluss der mittleren Rundheit (Stufen 1-9) auf die T₃-Streuung

Die hinterlegte grüne Trendlinie des Diagramms 4.2.4 zeigt hierbei den maximalen Einfluss der Rundheitsabweichung auf die Streuung der T₃-Totaltemperatur an. Diese Trendlinie wurde, basierend auf der Annahme, dass sich bei einem exakt runden HDV-Gehäuse keine T₃-Totaltemperaturstreuung einstellt, durch den Ursprung gelegt. Ausnahmen wären Störungen in der Zuströmung, die dennoch eine Streuung verursachen können. Mit steigender Rundheitsabweichung nimmt auch die Streuung der Verdichteraustrittstemperatur zu.

Im nächsten Schritt wird die Rundheitsabweichung des Gesamtverdichters gemäß Tabelle 4.2.1 in die einzelnen Bereiche unterteilt und ebenfalls mit der Streuung der T₃-Totaltemperatur untersucht. Ziel ist es hierbei, den Einfluss der T₃-Streuung einem bestimmten Bereich des HDV-Gehäuses zuweisen zu können. Im Folgenden sind drei Diagramme aufgeführt, die sich mit jeweils einem Bereich des HDV-Gehäuses befassen.

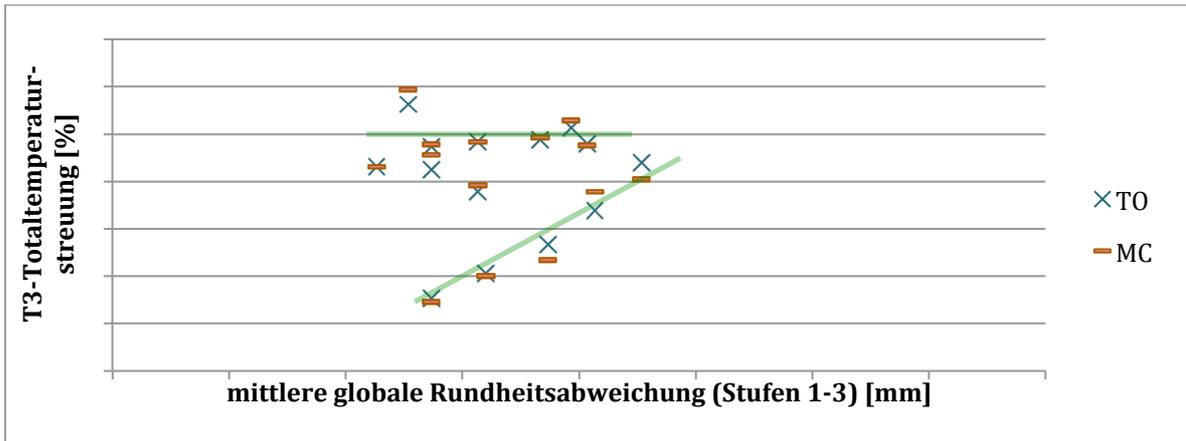


Diagramm 4.2.5 mittlere Rundheit (Stufen 1-3) über T3-Totaltemperaturstreuung

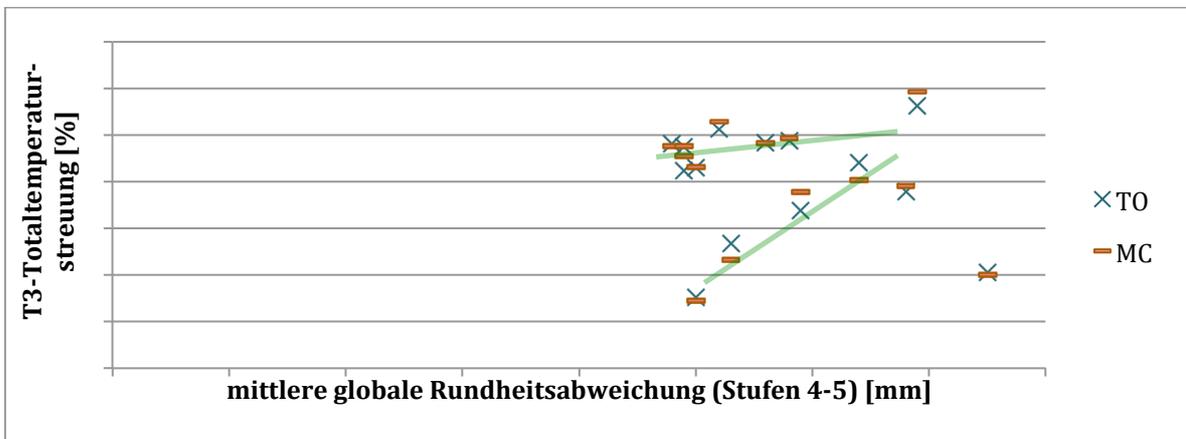


Diagramm 4.2.6 mittlere Rundheit (Stufen 4-5) über T3-Totaltemperaturstreuung

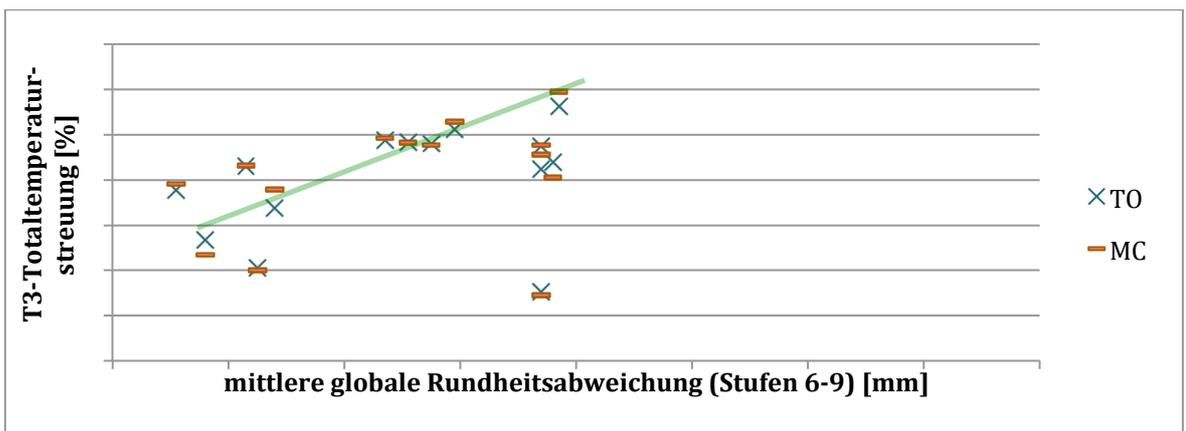


Diagramm 4.2.7 mittlere Rundheit (Stufen 6-9) über T3-Totaltemperaturstreuung

Im Grunde wird die T3-Totaltemperaturstreuung durch den kombinierten Einfluss des gesamten Verdichters beeinflusst. Dennoch lassen sich Informationen den einzelnen Bereichen des HDV-Gehäuses entnehmen.

Diagramm 4.2.5 befasst sich mit der mittleren Rundheitsabweichung der ersten drei Stufen des HDV-Gehäuses. Über die hierfür charakteristische Rundheitsabweichung von X mm – X mm bilden die Messpunkte aufgrund der Streuung der T3-Totaltemperatur keinen klaren Trend. Mit steigender Rundheitsabweichung nähern sich beide Trendlinien an. Dabei treten keine niedrigen Streuungen auf.

Diagramm 4.2.6 spiegelt die mittlere Rundheitsabweichung der Stufen vier und fünf wieder. In diesem Bereich ist die mit Abstand größte Rundheitsabweichung vorzufinden. Bis auf eine Ausnahme weist dieser HDV-Bereich ähnliche Tendenz wie der erste Bereich auf.

Wird nun Diagramm 4.2.7 betrachtet, ist hier ein klarer Trend zu erkennen. Mit zunehmender Rundheitsabweichung nimmt auch die T3-Totaltemperaturstreuung zu. Lediglich ein Motor weist trotz relativ großer Rundheitsabweichung in den hinteren Stufen eine niedrige T3-Streuung auf.

Hierdurch lässt sich ableiten, dass die Rundheitsabweichung des hinteren Bereichs des HDV-Gehäuses den größten Einfluss auf die T₃-Totaltemperaturstreuung hat. Dennoch ist nicht zu vernachlässigen, dass der additive Einfluss aller neun Stufen den exaktesten Zusammenhang wiedergibt, wie in Diagramm 4.2.4 ersichtlich.

Aufbauend auf das Diagramm 4.2.7, welches einen guten Zusammenhang zwischen der Rundheitsabweichung des hinteren Bereichs des HDV-Gehäuses und der T₃-Totaltemperaturstreuung wiedergibt, wird hier die T₃-Totaltemperaturstreuung in ihre einzelnen Temperaturmessungen zerlegt und über dieselbe Rundheitsabweichung in Diagramm 4.2.8 analysiert.

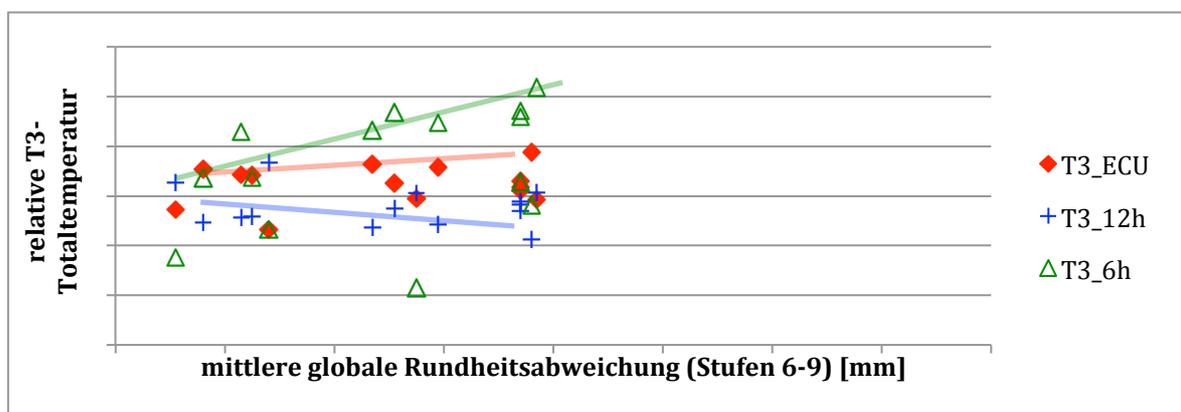


Diagramm 4.2.8 relative T3-Totaltemperatur über Rundheitsabweichung (Stufen 6-9)

Dem Diagramm 4.2.8 ist dabei zu entnehmen, dass bei geringer mittlerer Rundheitsabweichung der hinteren vier Stufen des Hochdruckverdichters die Streuung der T3-Totaltemperatur ebenso minimal ist, da hier die linearen Trendlinien der einzelnen T3-Messungen zusammenlaufen. Nimmt die mittlere Rundheitsabweichung zu, fächern sich die relativen Totaltemperaturen der drei Messsonden auf und bestätigt die erfasste T₃-Totaltemperaturstreuung. Dabei wird die Streuung maßgeblich durch die an der 6h-Position befindlichen Temperaturmesssonde beeinflusst, da diese eine hohe Zunahme der relativen T_{3_6h}-Totaltemperatur bei steigender Rundheitsabweichung anzeigt. Die Rotor-Exzentrizität der Hochdruckwelle hat dabei einen hohen Einfluss. Die globale Rundheitsabweichung wirkt sich kaum auf die relativen Totaltemperaturen T_{3_ECU} und T_{3_12h} aus.

Im Flugbetrieb ist die T_{3_ECU}-Totaltemperatur die einzige gemessene HDV-Austrittstemperatur. Nimmt die Rundheitsabweichung der HDV-Gehäuse zu, steigt die T_{3_ECU}-Totaltemperatur leicht an. Diese Messung ist jedoch für den tatsächlichen Durchschnitt nicht aussagekräftig, da die T_{3_6h}-Totaltemperatur in wesentlich höherem Maße zunimmt. Gemittelt über den Umfang wird somit bei hohen Rundheitsabweichungen eine zu niedrige relative Totaltemperatur gemessen. Somit werten die Steuer- und Regelungssysteme Daten aus, die im Umfang stark variieren können, was zu Leistungsverlusten führen kann.

Es gilt allgemein, dass bei einer kleinen Rundheitsabweichung die Totaltemperaturstreuung ebenfalls gering ist.

Lokale Rundheit

Bisher wurde global für jede Stufe eine einzige Rundheitsabweichung erfasst und in die Bewertung eingearbeitet. Nun wird versucht, den lokalen exakten Einfluss der Rundheitsdiagramme zu untersuchen. Die Theorie hierzu wurde in Kapitel 3.6 näher beschrieben. Zum einen wird der lokale Einfluss der Rundheit ohne die Drallwirkung der Strömung in den Bereichen der T3-Totaltemperaturmesssonden und zum anderen im Anschluss mit den Ergebnissen der Drallwirkung (Kapitel 3.5) untersucht. Ziel ist hierbei, einen möglichen Zusammenhang zwischen den lokalen Unebenheiten und der

Temperaturstreuung zu erfassen. Da sich die Untersuchungen bislang auf den letzten Bereich des HDV-Gehäuses fokussiert haben, wird im Folgenden die lokale Auswertung der Rundheitsdiagramme ebenfalls auf diesen Bereich beschränkt. Der lokale Spalt wird den Rundheitsdiagrammen entnommen und wird jeweils einer Totaltemperatursonde zugewiesen.

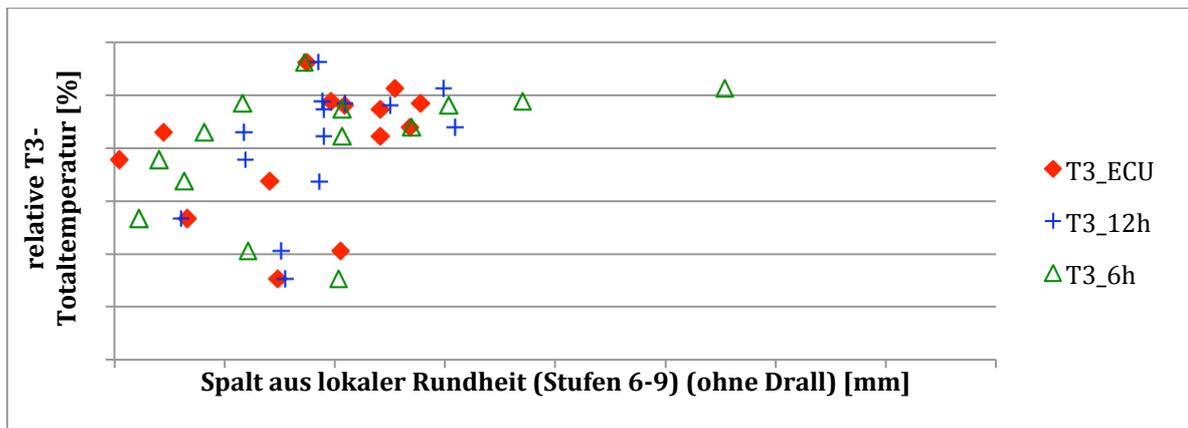


Diagramm 4.2.9 T3-Streuung über lokale Rundheit (ohne Drall)

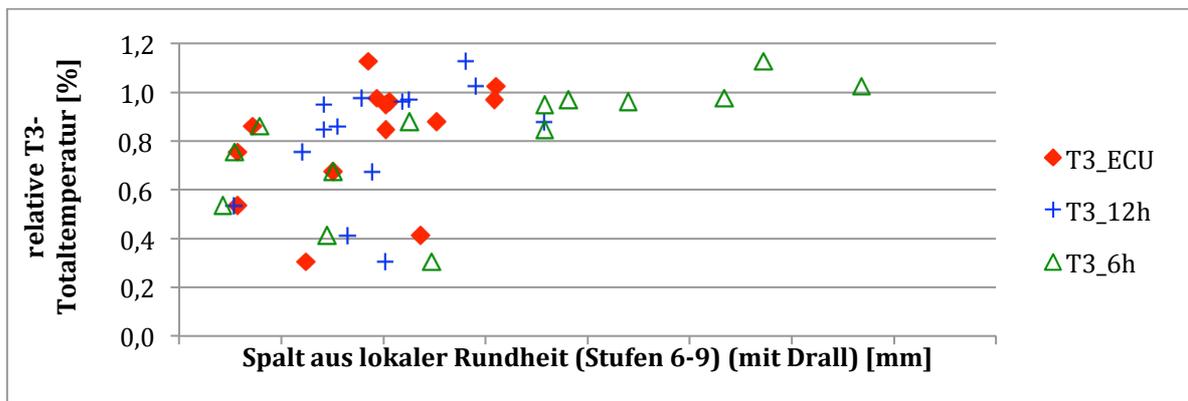


Diagramm 4.2.10 T3-Streuung über lokale Rundheit (mit Drall)

In der Gegenüberstellung der lokalen Rundheit mit der prozentualen T3-Totaltemperaturstreuung ist in beiden Diagrammen sowohl mit als auch ohne Drallwirkung kein Trend sichtbar.

Wird der lokale Spalt aus der lokalen Rundheit bis X mm betrachtet, lässt sich die relative T3-Totaltemperatur nicht direkt zuordnen. Hier sind alle relativen T3_ECU und T3_12h Totaltemperaturmessungen untergebracht. Erst bei einem lokalen Spalt oberhalb von X mm ist erkennbar, dass nur die relativen T3_6h-Messungen einen größeren lokalen Spalt aufweist. Dabei ist die relative Abweichung der T3_6h Totaltemperatur von einem Prozent auch bei zunehmender Spalttiefe konstant.

4.2.3 Rotor-Exzentrizität der Hochdruckwelle

In Kapitel 3.7 wurde auf die Grundlage der Rotor-Exzentrizität eingegangen. Im Folgenden wird der Einfluss dieser Spaltverschiebung mit der Streuung der Verdichteraustrittstemperatur untersucht.

Wird wie zu Beginn dieses Kapitels die konventionelle Analyse der triebwerksübergreifenden einzelnen T3-Totaltemperaturmessungen im Diagramm 4.2.1 betrachtet, kann folgende Aussage getroffen werden.

Etwa 60% der getesteten Triebwerke haben ihre höchste gemessene Totaltemperatur an der unten befindlichen 6h-Position. Wie in Kapitel 2.5 und 2.6 formuliert, lässt sich ein Zusammenhang zwischen der relativen Totaltemperatur am Austritt des HDV und dem jeweiligen Tipspalt erkennen. Ist die relative Totaltemperatur höher als der Durchschnitt, deutet dies auf hohe Spaltverluste hin. Folglich befindet sich an dieser Position ein lokaler Spalt, der zum Beispiel durch die Rotor-Exzentrizität der Hochdruckwelle verursacht werden kann.

Da 60% der Triebwerke ihre höchste relative Totaltemperatur an der unten befindlichen T3_6h-Position besitzen, muss sich dort im Betrieb ein größerer Tipspalt einstellen. Dies lässt sich durch eine nach oben versetzte Hochdruckwelle infolge der Rotor-Exzentrizität erklären. Folglich ist in diesen Triebwerken das Offset des ölgedämpften Lagers (Lager 5) nicht optimal eingestellt.

Durch die Einspannung der Hochdruckwelle nimmt der Einfluss der Rotor-Exzentrizität in den hinteren Stufen des Hochdruckverdichters zu. Aus diesem Grund wird im Folgenden nur der hintere Bereich der Hochdruckwelle untersucht. Hierbei wird der Einfluss der Rotor-Exzentrizität mit und ohne Drallwirkung dargestellt. Dabei wird nur der zusätzliche Spalt untersucht, der durch die Rotor-Exzentrizität verursacht wird. Somit kann ein positiver Spalt der Rotor-Exzentrizität den Gesamtpalt vergrößern und ein negativer Spalt der Rotor-Exzentrizität den Gesamtpalt verkleinern.

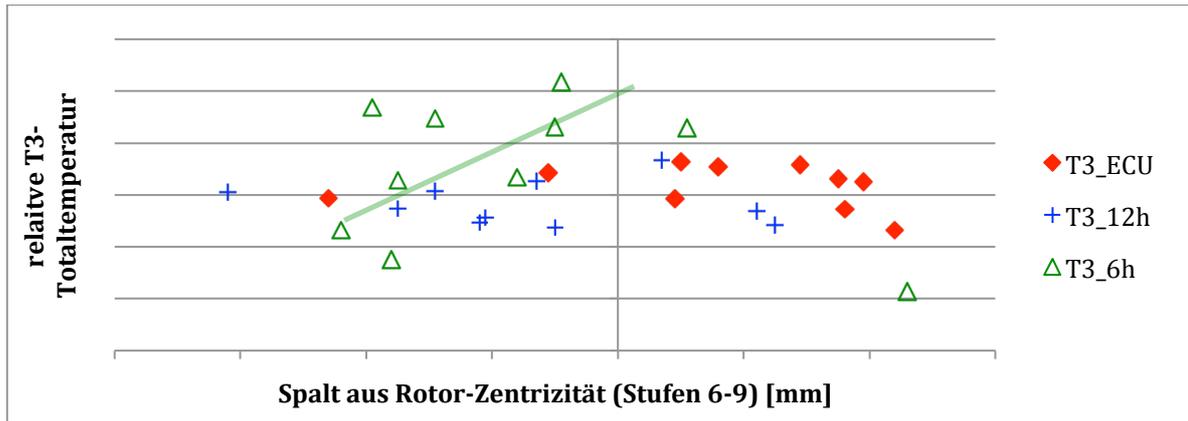


Diagramm 4.2.11 Spalt aus Rotor-Exzentrizität (ohne Drall)

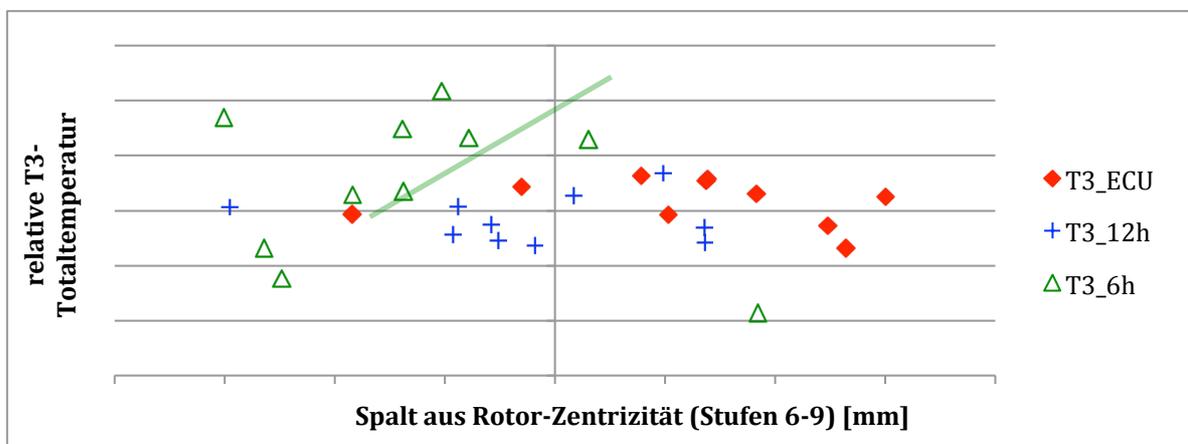


Diagramm 4.2.12 Spalt aus Rotor-Exzentrizität (mit Drall)

Wird in diesen beiden Diagrammen die relative T3_6h-Totaltemperatur betrachtet, lässt sich ein Zusammenhang mit dem Spalt aus der reinen Rotor-Exzentrizität bestimmen. Mit zunehmendem Spalt aus der Rotor-Exzentrizität steigt die relative T3_6h-Totaltemperatur. Führt die Rotor-Exzentrizität zur Reduzierung des Spaltes sinkt ebenfalls die relative T3_6h-Totaltemperatur an. Werden die anderen beiden relativen T3-Totaltemperaturen betrachtet, sind diese relativ konstant und lassen keinen direkten Zusammenhang zwischen der Rotor-Exzentrizität und relativer T3-Totaltemperatur erkennen.

4.3 Steuerungssystem der aktiven Rotorspalt-Regelung der Hochdruckturbinen

In Kapitel 3.9 wurde auf die jeweiligen Eingangsparameter der Regelung der aktiven Spaltkontrolle der Hochdruckturbinen eingegangen. Bevor erklärt werden kann, welche Auswirkungen abweichende Messwerte auf das Steuerungssystem des Motors haben, soll nachvollzogen werden, wie das Regelungssystem funktioniert.

In Diagramm 4.3.1 wird die Ventilklappenstellung der Kühlluftmischung der aktiven Spaltkontrolle über die Drehzahl der Hochdruckwelle für beide Flugfälle dargestellt.

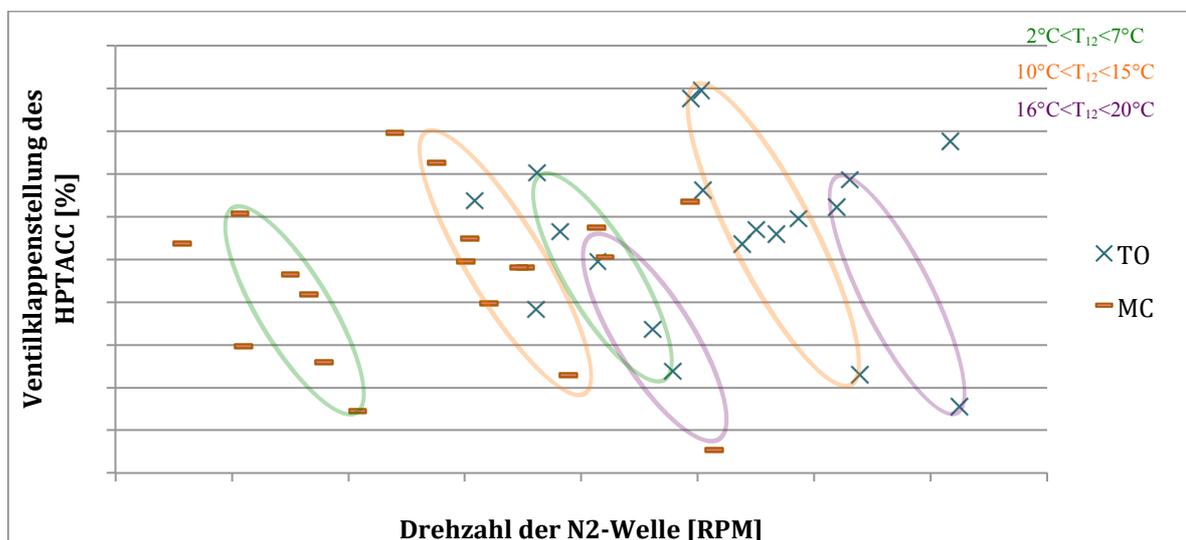


Diagramm 4.3.1 Klappenposition über N2-Drehzahl (unkorrigiert)

Wird an jedem Messpunkt die gemessene T12-Totaltemperatur eingeblendet, zeigen sich in der Punktwolke drei Gebiete mit jeweils konstanter Totaltemperatur auf. Hierbei ist erkennbar, dass sich mit steigender T12-Totaltemperatur diese Gebiete in beiden Flugfällen parallel nach rechts verschieben. Wird die T12-Totaltemperatur für alle Triebwerke auf einheitliche 15°C korrigiert, kann durch entsprechende Korrekturfaktoren die Ventilklappenstellung der aktiven Rotorspalt-Regelung angepasst werden.

Hierdurch verschieben sich die Punkte aus Diagramm 4.3.1 nur in vertikale Richtung, da bei gleicher Drehzahl einzig und allein die Ventilklappenstellung korrigiert wird. Das Ergebnis ist im nachfolgenden Diagramm 4.3.2 zu erkennen.

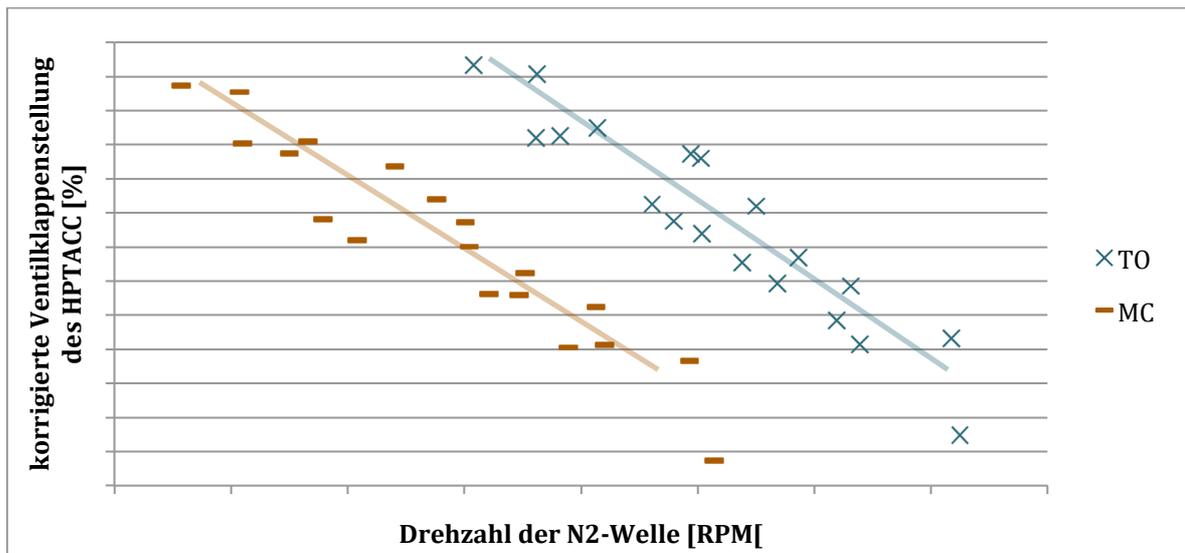


Diagramm 4.3.2 korrigierte Klappenposition ($T_{12}=15^{\circ}\text{C}$) über N2-Drehzahl

Eine wichtige Aussage aus dem Diagramm 4.3.2 ist, dass unter Ausschluss des T_{12} -Einflusses bei steigender N2-Drehzahl die Ventilklappenstellung der HPTACC prozentual kleiner wird, wodurch eine höhere HPT-Gehäusetemperatur eingestellt wird. Dabei handelt es sich um einen linearen Zusammenhang, wobei der Trend beider Flugfälle parallel verschoben ist.

Für den Flugfall „TO“ liegt bei gleicher Drehzahl die Ventilklappenstellung der HPTACC um 11% höher. Die Erklärung hierfür ist, dass bei „TO“ ein anderes TCRingRat (Formel 3.2.1) angefahren wird, weil durch die höheren Belastungen eine höhere thermische Ausdehnung auf die Laufschaufeln wirken. Ebenfalls ist bei vergleichbarer Ventilklappenstellung ein höheres Temperaturniveau der Kühlluft zu erwarten, da bei „TO“ im Hochdruckverdichter höhere Druck- und Temperaturzustände erreicht werden.

Um den Einfluss abweichender Messwerte auf die aktive Spaltkontrolle der HDT nachvollziehen zu können, wird dies anhand der gemessenen Verdichteraustrittstemperatur beispielhaft erklärt. Um diesen Regelungsmechanismus zu verstehen, soll nachvollzogen werden, welchen Einfluss die Ventilklappenstellung auf die Zapfluftzufuhr hat und welche Auswirkungen die steigende Drehzahl der Hochdruckwelle auf die Steuerparameter der HPTACC verursacht. Ein wichtiger Indikator für das Regelungssystem ist hierbei der Totaltemperaturquotient TCRingRat aus HDV-Austrittstemperatur (T_{3_ECU}) und HDT-Gehäusetemperatur (TC_ECU).

Die Reduzierung der Ventilkappenstellung der HPTACC führt dazu, dass sich das Mischverhältnis der HDT-Gehäusekühlluft ändert (Diagramm 3.9.1), indem im Mischverhältnis mehr Zapflut der 9. Stufe und weniger der 4. Stufe entnommen wird. Da die HDT-Gehäusekühltemperatur steigt, dehnt sich das dünnwandige Gehäuse thermisch aus und vergrößert somit den Tipspalt. Da bei steigender Drehzahl auf den Laufschaufeln höhere Belastungen wirken, strecken sich diese und minimieren wieder den Tipspalt.

Bei steigender physikalischer N2-Drehzahl nimmt die HDV-Austrittstemperatur zu. Da die Zielgröße der aktiven Rotorspalt-Regelung der Quotient (TCRingRat) aus HDV-Austrittstemperatur (T_3) und HDT-Gehäusetemperatur (T_C) ist, wird die HDT-Gehäusetemperatur reguliert und steigt ebenfalls an. In Diagramm 4.3.3 ist die physikalische N2-Drehzahl über der regulierenden Zielgröße, dem Temperaturverhältnis TCRingRat, dargestellt.

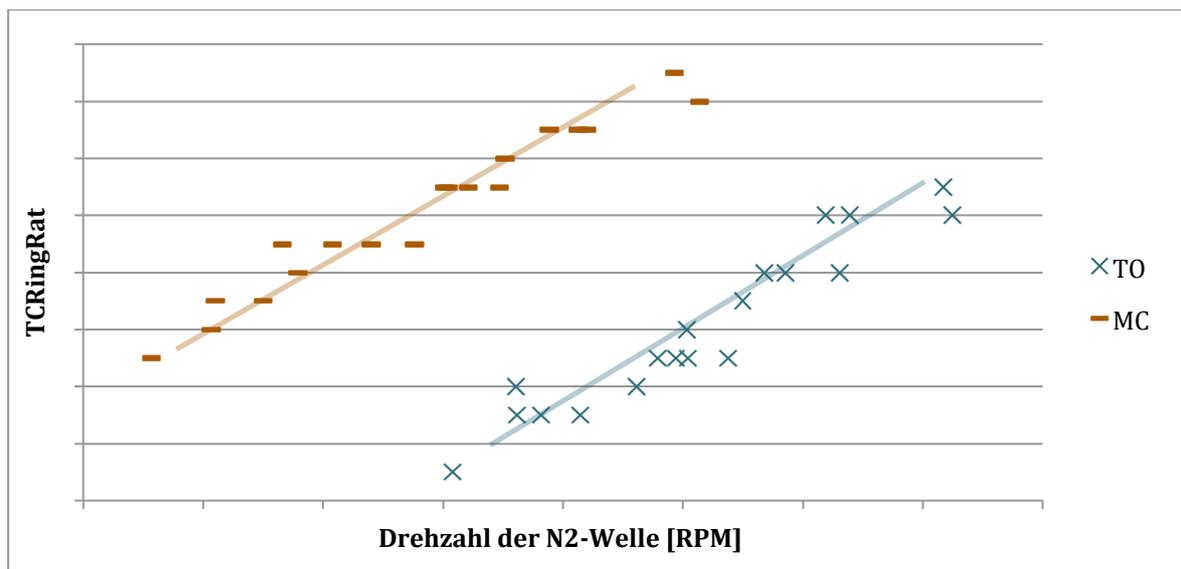


Diagramm 4.3.3 TCRingRat über N2-Drehzahl

Da ein direkter Zusammenhang zwischen der Drehzahl der Hochdruckwelle und dem TCRingRat bzw. der korrigierten Ventilkappenstellung des HPTACC besteht, lässt sich nun ebenfalls ein Zusammenhang zwischen dem Temperaturquotienten TCRingRat und der korrigierten Ventilkappenstellung herstellen. In Diagramm 4.3.4 ist die Ventilkappenstellung ebenfalls auf eine konstante T12-Totaltemperatur von 15°C korrigiert.

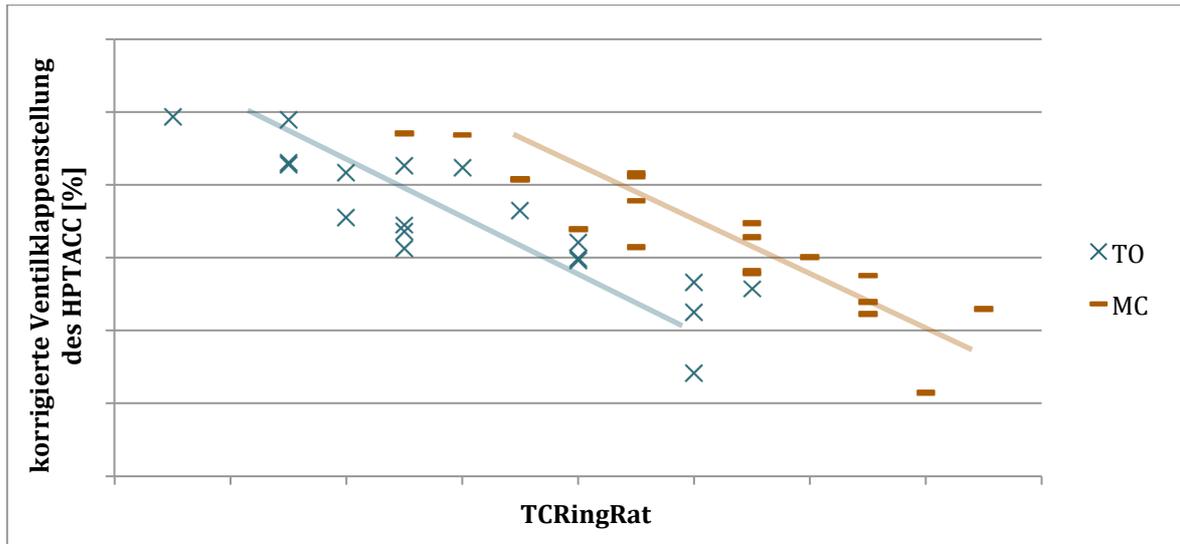


Diagramm 4.3.4 korrigierte Klappenposition (T12=15°C) über TCRingRat

Bei steigender Drehzahl (Eingangsparameter) steigt das TCRingRat (Zielparameter) durch gleichzeitig sinkende Ventilklappenstellung des HPTACC (Regelungsparameter). Anhand dieser zuvor erstellten Diagramme lässt sich nun die Auswirkung abweichender Messwerte auf das Steuerungssystem der aktiven Spaltkontrolle der Hochdruckturbinen erklären.

Einfluss einer abweichenden T3-Totaltemperatur

Wird davon ausgegangen, dass sich durch den Einfluss starker Rundheitsabweichungen und der nach unten verschobenen Rotor-Exzentrizität ein zu großer Tipspalt im oberen Bereich des Hochdruckverdichters einstellt, wird hier lokal eine zu hohe Verdichteraustrittstemperatur (T_{3_ECU}) gemessen. Dies kann ebenfalls bei einer fehlerhaften T3-Messung passieren.

Die Zielgröße für die Rotorspalt-Regelung ist das Totaltemperaturverhältnis (TCRingRat) aus T_{3_ECU} und T_{C_ECU} . Dieses Totaltemperaturverhältnis ist in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen und dem Betriebspunkt dem Diagramm 4.3.3 zu entnehmen. Die optimale HDT-Gehäusetemperatur wird nun ermittelt, indem die Formel 3.2.1 nach der HDT-Gehäusetemperatur umgestellt wird.

$$T_{C_ECU} = T_{3_ECU} \cdot T_{CRingRat}$$

Formel 4.3.1 HDT-Gehäusetemperatur

Wird nun eine zu hohe relative Verdichteraustrittstemperatur ($T3_ECU$) gemessen, stellt sich eine falsche Zielgröße aus dem Quotienten von $T3_ECU$ und TC_ECU ein. Dennoch wird nach Formel 4.3.1 die scheinbar gewünschte HDT-Gehäusetemperatur angefahren. Die regulierende Größe, die Ventilkappenposition, die die Kühlluft für das HDT-Gehäuse aus der Zapfluft der vierten und neunten Stufe zusammensetzt, fährt prozentual runter (Diagramm 3.9.1), um eine wärmere Kühlluft und somit eine höhere HDT-Gehäusetemperatur zu erreichen.

Die Folge ist, dass sich durch die zu hohe HDT-Gehäusetemperatur ein vergrößerter Tipspalt einstellt. Da die Hochdruckturbine den höchsten Leistungsumsatz besitzt, wirken sich die hier auftretenden Spaltverluste negativ auf die Gesamtleistung des Triebwerks aus.

4.4 Eingangparameter der Regelung mit dem Temperaturprofil am Turbinenaustritt

Neben den Temperaturprofilen (umfangsorientiert und radial orientiert) kann ebenso die Totaltemperaturstreuung am Turbinenaustritt betrachtet werden. Für jeden Motor wird hierbei die T55-Streuung berechnet, indem die prozentuale Differenz der auf die jeweilige Durchschnittstemperatur relativierten minimalen und maximalen Totaltemperatur ermittelt wird.

In Diagramm 4.4.1 ist diese T55-Streuung für beide Flugfälle grafisch aufbereitet.

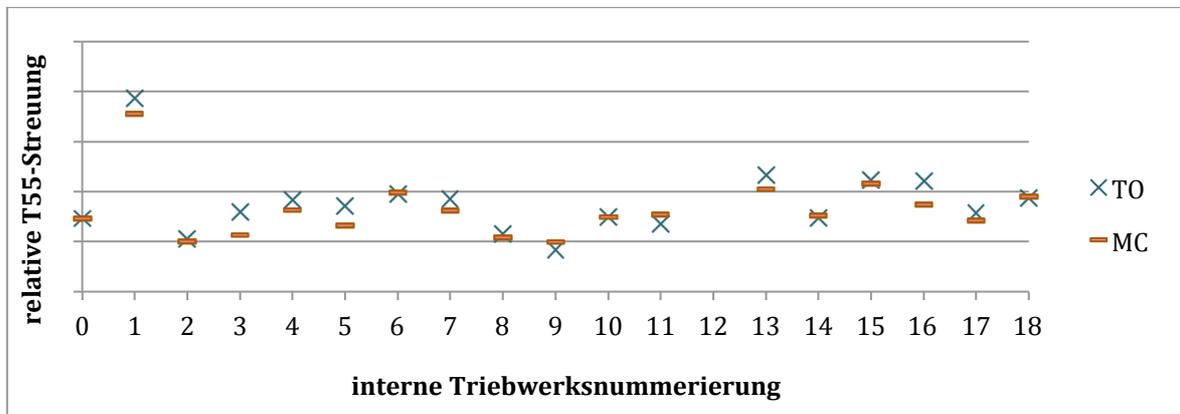


Diagramm 4.4.1 T55-Totaltemperaturstreuung

Diese T55-Streuung (Diagramm 4.4.1) wird nun betrachtet, um im Folgenden eine Erklärung für die jeweilige relative T55-Streuung der einzelnen Triebwerke zu finden. Die Ursache der T55-Streuung kann dabei von mehreren Parametern abhängig sein. Zum einen wird die Rotor-Exzentrizität und zum anderen die Verdichteraustrittstemperatur der T55-Streuung gegenübergestellt.

Im ersten Schritt ist der Einfluss der Rotor-Exzentrizität der Hochdruckwelle mit der T55-Streuung in Nähe der Gehäusewandung (86%) gegenüberzustellen. Da die Auswirkungen der Rotor-Exzentrizität in Spaltnähe am größten sind, wird die T55-Streuung nicht über alle zur Verfügung stehenden Messpunkte erfasst, sondern nur über die Totaltemperatur in Spaltnähe bei 86% (Abbildung 3.3.3).

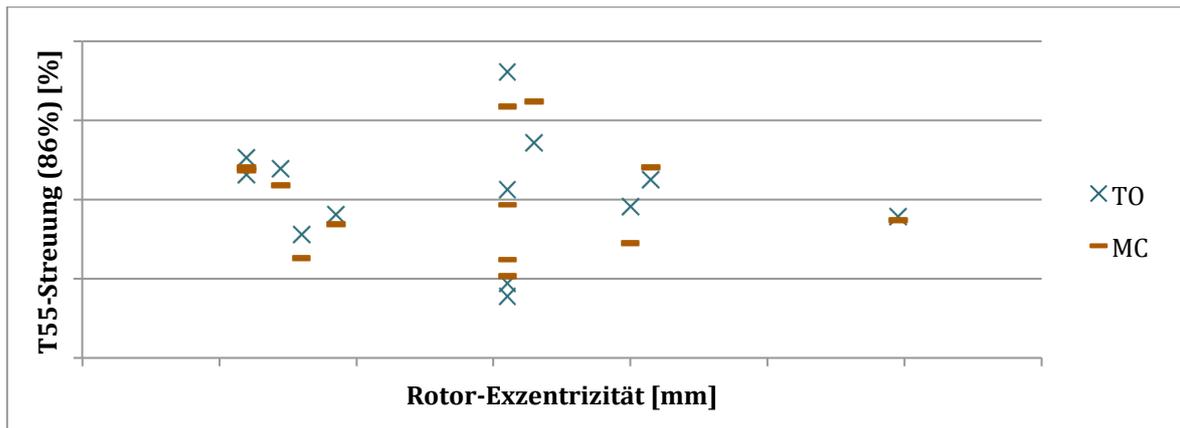


Diagramm 4.4.2 T55-Streuung (86%) über Rotor-Exzentrizität

Mit steigender Rotor-Exzentrizität der Hochdruckwelle ist dem Diagramm 4.4.2 kein erkennbarer Einfluss auf die T55-Streuung zu entnehmen.

Im nächsten Schritt wurde der Winkel der Rotor-Exzentrizität der Hochdruckwelle (Pfeilrichtung) mit dem Temperaturprofil über den Umfang für jedes einzelne Triebwerk verglichen. Der Winkel zeigt an, in welche Richtung das HPT-Gehäuse aus der Sicht einer HPT-Laufschaukel verschoben ist bzw. wo die Rotor-Exzentrizität einen Spalt erzeugt. Diagramm 4.4.3 zeigt aus allen getesteten Triebwerken einen Beispielfall auf.

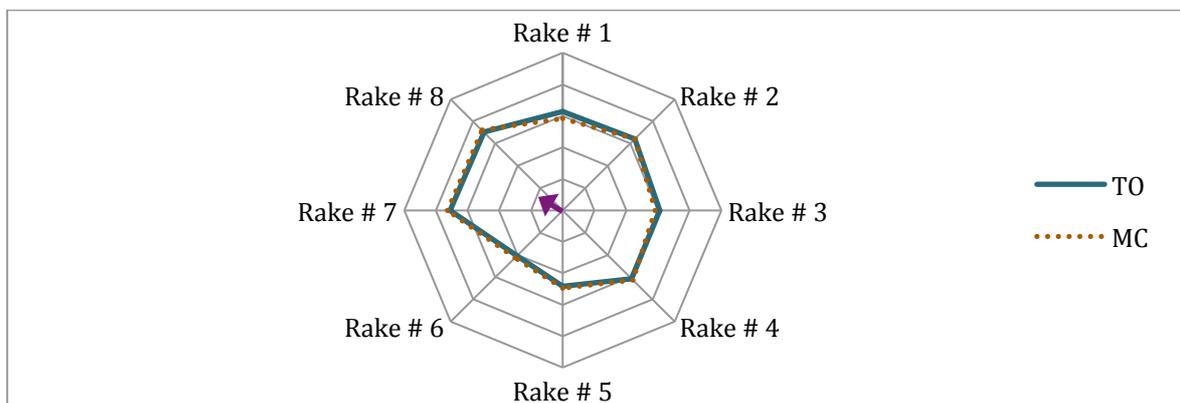


Diagramm 4.4.3 relatives T55-Profil über den Umfang (Beispiel)

Alle Diagramme zeigen keinen Zusammenhang zwischen der Rotor-Exzentrizität (Pfeil) der Hochdruckwelle und dem T55-Profil an. Bei gleicher Ausrichtung der Rotor-Zentrizität entstehen völlig unterschiedliche T55-Profile. Ein direkter Zusammenhang kann somit ausgeschlossen werden.

Nun wird die Verdichteraustrittstemperatur mit der Streuung der T55-Totaltemperatur verglichen. Hierfür wird zuerst ebenfalls die Streuung der Verdichteraustrittstemperatur (T3) verglichen.

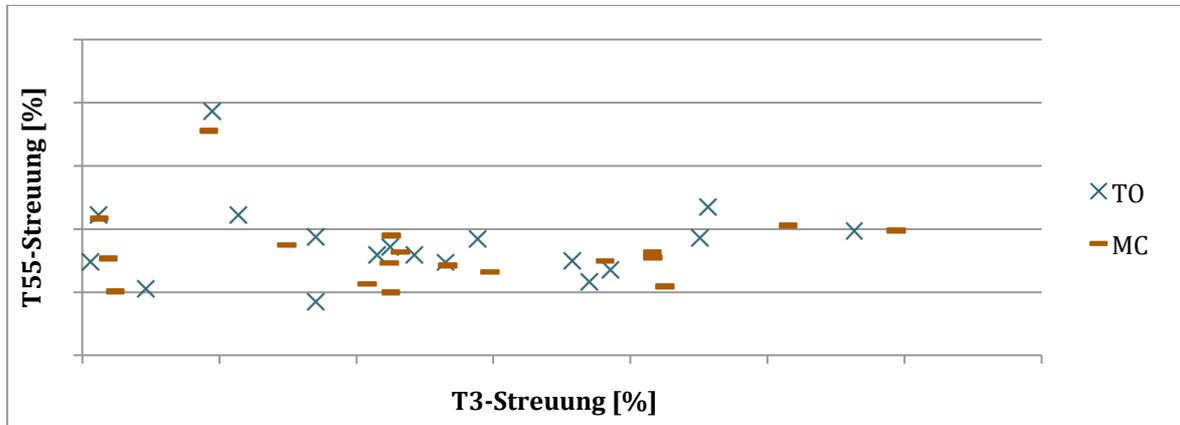


Diagramm 4.4.4 T55-Streuung über T3-Streuung

Die T3-Streuung hat ebenfalls keinen erkennbaren Einfluss auf die T55-Streuung. Lediglich die Streuung selbst ist am Verdichteraustritt wesentlich kleiner als am Turbinenaustritt.

In den folgenden beiden Diagrammen wird nun sowohl die T3-Streuung als auch die T55-Streuung in die einzelnen relativen Totaltemperaturen über den Umfang verteilt aufgelöst und dargestellt. Dabei werden für relative T55-Totaltemperaturen nur diejenigen „Rakes“ ausgewertet, die an den radialen Positionen bei 14%, 50% und 86% die Totaltemperatur erfassen (Abbildung 3.3.3).

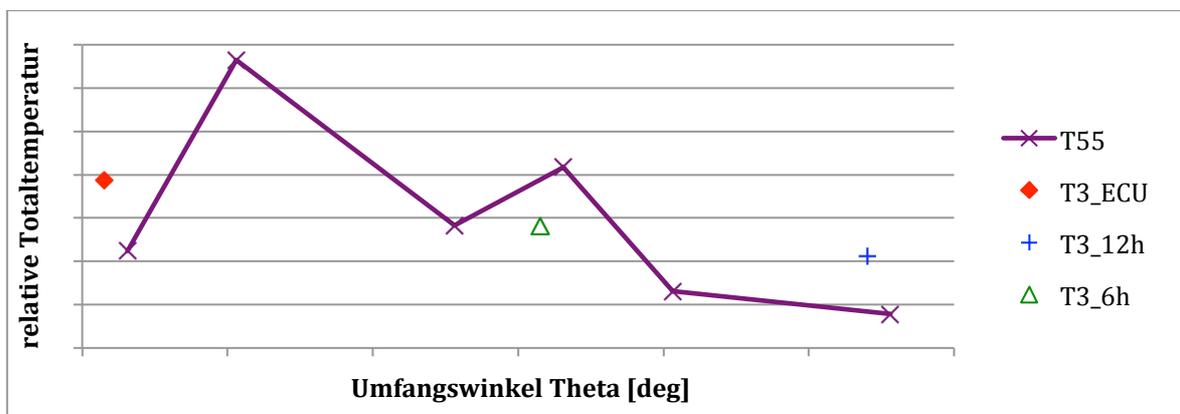


Diagramm 4.4.5 relative T55- über relativer T3-Totaltemperatur (Beispiel 1)

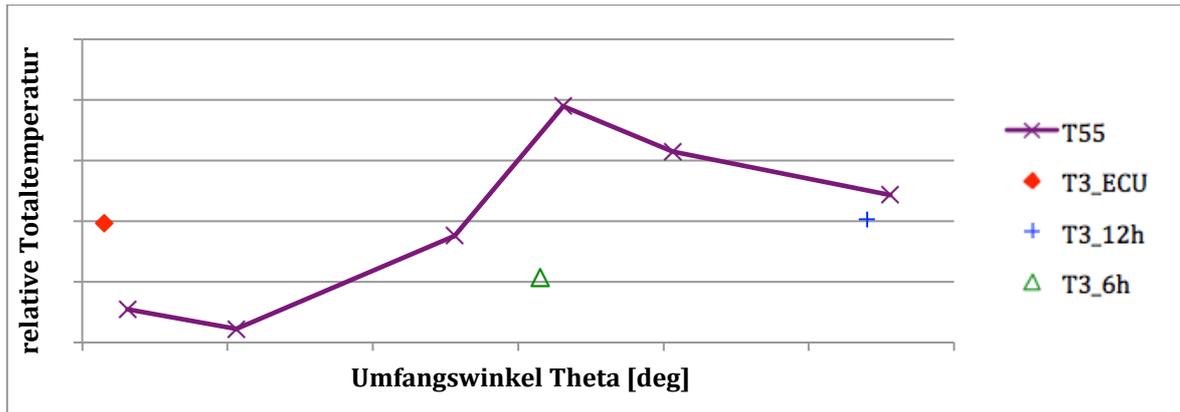


Diagramm 4.4.6 relative T55- über relativer T3-Totaltemperatur (Beispiel 2)

Beide Diagramme spiegeln den jeweiligen Extremfall wieder. In Diagramm 4.4.4 ist zu erkennen, dass die relative T55-Totaltemperatur dem Trend der T3-Totaltemperatur folgt. Nimmt über dem Umfangswinkel die relative T3-Totaltemperatur ab, so ist dieselbe Tendenz an der relativen T55-Totaltemperatur zu erkennen.

In Diagramm 4.4.5 ist exakt gegenläufiger Trend zu erkennen. Nimmt über den Umfang die relative T3-Totaltemperatur ab, so steigt die relative T55-Totaltemperatur an.

Die Streuung der T55-Totaltemperatur ist mit maximal 8% nicht unerheblich. Dennoch lässt diese sich nicht durch die wenigen Parameter erklären, die hier untersucht wurden. Rückschlüsse auf die untersuchten Module lassen sich durch die reine Analyse der relativen T55-Totaltemperaturverteilung nicht gewinnen.

5 Zusammenfassung

Verdichterwirkungsgrad

Der Verdichterwirkungsgrad lässt sich durch zwei Einflussfaktoren treffend beschreiben. Dabei kann jedem Einflussfaktor ein Bereich des Hochdruckverdichters zugewiesen werden (Abbildung 5.1.1). Der vordere Bereich des Hochdruckverdichters (Stufen 1-5) wird maßgeblich durch die Rundheit des HDV-Gehäuses beeinflusst (Diagramm 4.1.1 und 4.1.2). Die Auslenkung der Hochdruckwelle sorgt dafür, dass im hinteren Bereich des Hochdruckverdichters (Stufen 6-9) der Verdichterwirkungsgrad durch den steigenden Einfluss der Rotor-Exzentrizität der Hochdruckwelle maßgeblich beeinflusst wird (Diagramm 4.1.5).

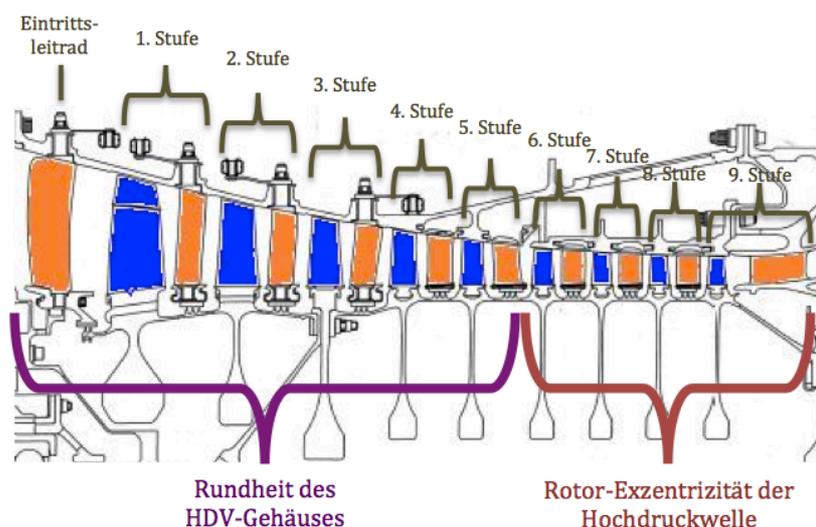


Abbildung 5.1.1 Einflussgrößen auf den Verdichterwirkungsgrad

Streuung der Verdichteraustrittstemperatur

Die horizontale Rotor-Exzentrizität der Hochdruckwelle übt lediglich einen Einfluss auf die unten befindliche T3_6h-Totaltemperatur aus. Dabei steigt die relative T3_6h-Totaltemperatur an, wenn der Spalt der Rotor-Zentrizität zunimmt (Diagramm 4.2.11). Die oben befindlichen Messsonden der T3-Totaltemperatur zeigen jedoch keinen Trend an.

Die Streuung der Verdichteraustrittstemperatur hat hingegen einen direkten Zusammenhang mit der Rundheitsabweichung des HDV-Gehäuses. Hierbei wird zuerst die

globale Rundheit des Gesamtverdichters betrachtet (Diagramm 4.2.4). Bei steigender Rundheitsabweichung nimmt dabei auch die Streuung der Verdichteraustrittstemperatur stetig zu. Je größer die Rundheitsabweichung wird, desto eher nähert sich die T3-Streuung, die maximal bei einem Prozent liegt, einem linearen Trend an. Wird der Hochdruckverdichter in drei Bereiche unterteilt, beeinflusst die Rundheitsabweichung der hinteren vier Stufen des HDV-Gehäuses die Streuung der Verdichteraustrittstemperatur maßgeblich (Diagramm 4.2.7). Durch den deutlich engeren Strömungskanal haben die Rundheitseffekte in den hinteren Stufen eine größere Wirkung auf die Strömung (Abbildung 5.1.2).

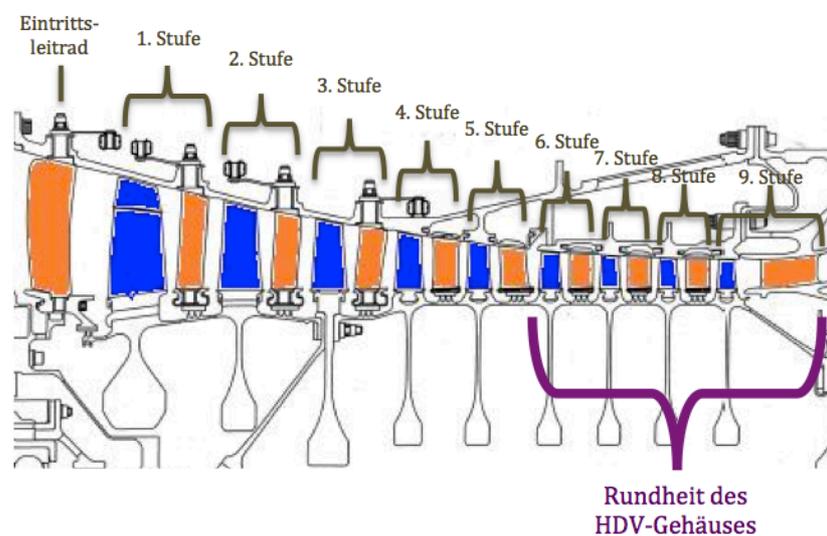


Abbildung 5.1.2 Einfluss auf die Streuung der Verdichteraustrittstemperatur

Abweichende Messwerte des ECU auf das Steuerungssystem der aktiven Spaltkontrolle der HDT

Das Steuerungssystem der aktiven Spaltkontrolle der Hochdruckturbinen reagiert sehr empfindlich auf abweichende Messwerte. Für diese Untersuchung wurde die Verdichteraustrittstemperatur herangezogen, da diese stark von der Rundheit des HDV-Gehäuses abhängig ist und somit eine T3-Streuung von bis zu einem Prozent besitzt.

Wird die in die Regelung einfließende Verdichteraustrittstemperatur T3_ECU durch lokale Rundheitsabweichungen um nur ein Prozent zu hoch gemessen, reagiert das Steuerungssystem hierauf empfindlich, so dass sich durch die zu warme HDT-Gehäusekühlung ein zu großer Tipspalt einstellt. Der große Tipspalt führt zu großen

Spaltverlusten in der HDT. Wegen des hohen Leistungsumsatzes in der HDT wirkt sich der Spaltverlust negativ auf die Gesamtleistung des Triebwerks aus.

Abbildung 5.1.3 zeigt die Auswirkung einer fehlerhaften T3-Messung auf die aktive Spaltkontrolle auf und geht auf die Konsequenzen ein.

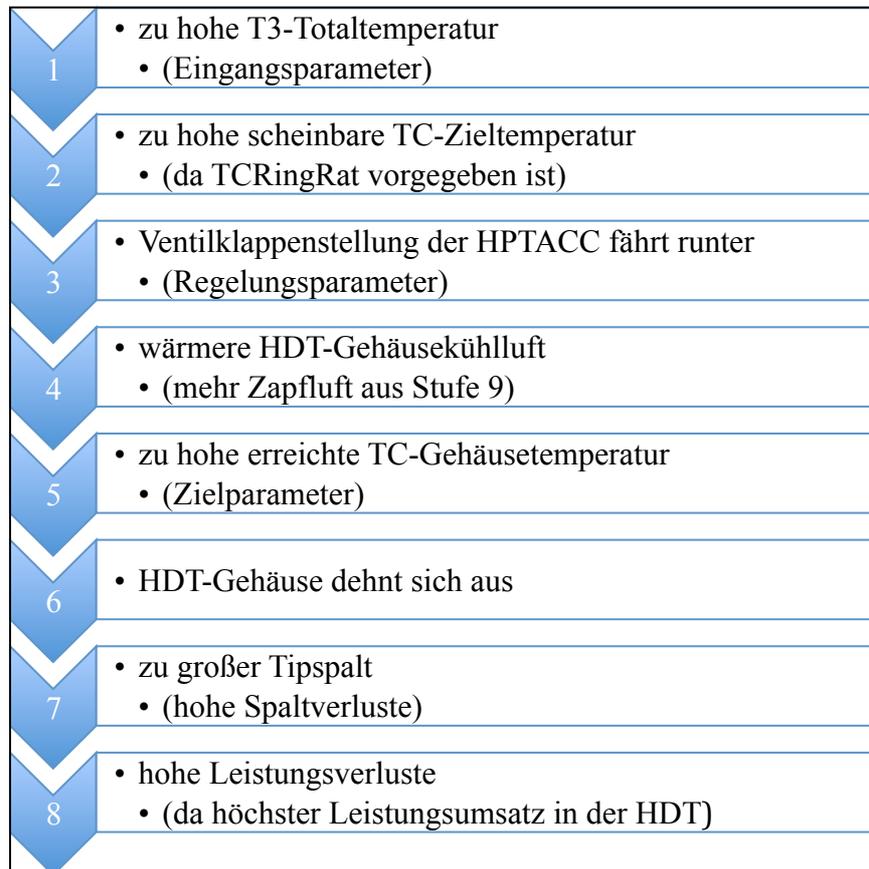


Abbildung 5.1.3 Abweichende Messwerte auf die HPTACC

T55-Profil

Das ausgeprägte Totaltemperaturprofil am Turbinenaustritt lässt keinen direkten Zusammenhang zur Verdichteraustrittstemperatur und zur Rotor-Exzentrizität der Hochdruckwelle zu. Hierfür ist der gesamte Einfluss der Strömungseffekte in der Brennkammer mit den zwanzig Kraftstoffdüsen und in der Hoch- und Niederdruckturbine zu groß, als dass eine separate Betrachtung einzelner möglicher Zusammenhänge zu brauchbaren Ergebnissen führen kann.

Strömungsversatz im Hochdruckverdichter

Wie schon in Kapitel 3.5 erwähnt, ist der durch die CFD-Simulation ermittelte Strömungsversatz nur für die Hauptströmung repräsentativ, da die Visualisierung der Stromlinien im Mittenschnitt durchgeführt wurde. Die Randströmung entlang der Blattspitzen unterliegt jedoch anderen überlagerten Einflüssen und wurde in diesem Zusammenhang nicht betrachtet.

Da jedoch die Erkenntnis dieses Strömungsversatzes (im Mittenschnitt) auf den Blattspitzenspalt mit der Rundheit des HDV-Gehäuses und der Rotor-Exzentrizität der Hochdruckwelle angewandt wurde, um die Streuung der Verdichteraustrittstemperatur zu erklären, sind die Ergebnisse nicht sehr aussagekräftig. Es war lediglich ein interessanter Ansatz, der im Rahmen dieser Arbeit aufgegriffen wurde und noch offenes Potential bietet.

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 2.1.1 CFM56-5C4 [LHT] | 2 |
| Abbildung 2.1.2 A340-300 mit vier CFM56-5C4 Triebwerken [LHT] | 3 |
| Abbildung 2.2.1 Module der Nieder- und Hochdruckwelle [ESM] | 4 |
| Abbildung 2.3.1 Anordnung einer Axialverdichterstufe [Bräunling] | 5 |
| Abbildung 2.3.2 Hochdruckverdichter des CFM56-5C4 [ESM] | 6 |
| Abbildung 2.4.1 Anordnung einer Axialturbinenstufe [Bräunling] | 8 |
| Abbildung 2.4.2 Hochdruckwelle mit Laufschaufeln (HDV+HDT) [ESM]..... | 9 |
| Abbildung 2.6.1 Grenzschrift [Schulze]..... | 11 |
| Abbildung 2.6.2 Nachlaufdele [Bräunling]..... | 12 |
| Abbildung 2.6.3 Spaltwirbel [Bräunling]..... | 13 |
| Abbildung 2.7.1 Wandhaftung [Schulze]..... | 14 |
| Abbildung 2.9.1 Kühlluft für die aktive HDT-Spaltkontrolle [ESM] | 17 |
| Abbildung 2.9.2 Auswirkung der HDT-Gehäusetemperatur auf den Tipspalt [ESM]..... | 17 |
| Abbildung 2.10.1 Flugrichtung des Triebwerks [ESM] | 18 |
| Abbildung 2.10.2 Koordinatensystem (ALF)..... | 18 |
| Abbildung 3.1.1 Prüfstand mit installiertem Triebwerk (CFM56-5C4)..... | 19 |
| Abbildung 3.2.1 wichtige Messsonden am Triebwerk [ESM] | 20 |
| Abbildung 3.2.2 T3-Messsonden..... | 21 |
| Abbildung 3.4.1 Hochdruckwelle (N2) auf dem HSG | 24 |
| Abbildung 3.5.1 Strömungsfläche im Mittenschnitt [Bräunling]..... | 25 |
| Abbildung 3.5.2 CFD-Simulation des Hochdruckverdichters [ESM]..... | 26 |
| Abbildung 3.5.3 Stromlinien der Laufschaufeln (1. Stufe, 5. Stufe und 9. Stufe) [LHT]... 27 | |
| Abbildung 3.5.4 Stromlinien der Leitschaufeln (1. Stufe, 5. Stufe und 9. Stufe) [LHT].... 27 | |
| Abbildung 3.5.5 Strömungsversatz im Standardkoordinatensystem (ALF)..... | 29 |
| Abbildung 3.6.1 Rundheitsmessung des HDV-Gehäuses | 30 |
| Abbildung 3.6.2 Module des Hochdruckverdichters [ESM]..... | 30 |
| Abbildung 3.6.3 Vermessung der Rundheit des geschliffenen HDV-Gehäuses | 31 |
| Abbildung 3.6.4 Koordinatensystem des Rundheitsdiagramms [LHT] | 32 |
| Abbildung 3.6.5 Koordinatensystem des transformierten Rundheitsdiagramms [LHT]..... | 32 |
| Abbildung 3.6.6 Rundheitsdiagramm 2. Stufe HDV (ALF) [LHT]..... | 33 |
| Abbildung 3.7.1 Anordnung der Lager mit Position der Linipot-Messung [ESM] | 34 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 3.7.2 Fixierung der Linipot-Sonde [ESM] | 35 |
| Abbildung 3.7.3 Ausschnitt einer Linipot-Messung [LHT] | 36 |
| Abbildung 3.8.1 Positionen der T3-Temperaturmesssonden [LHT] | 37 |
| Abbildung 3.9.1 Zapfluftentnahme und Kühlluftzufuhr für HPTACC [ESM] | 40 |
| Abbildung 3.9.2 Zapfluftentnahme und Kühlluftzufuhr der HPTACC am CFM56-5C4 ... | 40 |
| Abbildung 5.1.1 Einflussgrößen auf den Verdichterwirkungsgrad | 64 |
| Abbildung 5.1.2 Einfluss auf die Streuung der Verdichteraustrittstemperatur | 65 |
| Abbildung 5.1.3 Abweichende Messwerte auf die HPTACC | 66 |

Diagrammverzeichnis

| | |
|---|----|
| Diagramm 3.3.1 Temperaturprofil über den Umfang..... | 23 |
| Diagramm 3.3.2 Temperaturprofil über den Radius..... | 23 |
| Diagramm 3.9.1 Ventilkappenstellung des HPTACC [LHT] | 39 |
| Diagramm 4.1.1 korrigierter Verdichterwirkungsgrad über Rundheit (Stufen 1-3)..... | 42 |
| Diagramm 4.1.2 korrigierter Verdichterwirkungsgrad über Rundheit (Stufen 4-5)..... | 42 |
| Diagramm 4.1.3 korrigierter Verdichterwirkungsgrad über Rundheit (Stufen 6-9)..... | 42 |
| Diagramm 4.1.4 korrigierter Verdichterwirkungsgrad über Rundheit (Stufen 1-9)..... | 42 |
| Diagramm 4.1.5 Verdichterwirkungsgrad über Rotor-Exzentrizität der N2-Welle | 44 |
| Diagramm 4.2.1 relative T3-Totaltemperaturen für den Flugfall TO | 45 |
| Diagramm 4.2.2 T3-Totaltemperaturstreuung..... | 46 |
| Diagramm 4.2.3 durchschnittliche Rundheitsabweichung für jede HDV-Stufe | 47 |
| Diagramm 4.2.4 Einfluss der mittleren Rundheit (Stufen 1-9) auf die T3-Streuung | 48 |
| Diagramm 4.2.5 mittlere Rundheit (Stufen 1-3) über T3-Totaltemperaturstreuung | 49 |
| Diagramm 4.2.6 mittlere Rundheit (Stufen 4-5) über T3-Totaltemperaturstreuung | 49 |
| Diagramm 4.2.7 mittlere Rundheit (Stufen 6-9) über T3-Totaltemperaturstreuung | 49 |
| Diagramm 4.2.8 relative T3-Totaltemperatur über Rundheitsabweichung (Stufen 6-9)..... | 50 |
| Diagramm 4.2.9 T3-Streuung über lokale Rundheit (ohne Drall)..... | 52 |
| Diagramm 4.2.10 T3-Streuung über lokale Rundheit (mit Drall)..... | 52 |
| Diagramm 4.2.11 Spalt aus Rotor-Exzentrizität (ohne Drall)..... | 54 |
| Diagramm 4.2.12 Spalt aus Rotor-Exzentrizität (mit Drall) | 54 |
| Diagramm 4.3.1 Klappenposition über N2-Drehzahl (unkorrigiert)..... | 55 |
| Diagramm 4.3.2 korrigierte Klappenposition (T12=15°C) über N2-Drehzahl | 56 |
| Diagramm 4.3.3 TCRingRat über N2-Drehzahl..... | 57 |
| Diagramm 4.3.4 korrigierte Klappenposition (T12=15°C) über TCRingRat..... | 58 |
| Diagramm 4.4.1 T55-Totaltemperaturstreuung..... | 60 |
| Diagramm 4.4.2 T55-Streuung (86%) über Rotor-Exzentrizität..... | 61 |
| Diagramm 4.4.3 relatives T55-Profil über den Umfang (Beispiel)..... | 61 |
| Diagramm 4.4.4 T55-Streuung über T3-Streuung..... | 62 |
| Diagramm 4.4.5 relative T55- über relativer T3-Totaltemperatur (Beispiel 1)..... | 62 |
| Diagramm 4.4.6 relative T55- über relativer T3-Totaltemperatur (Beispiel 2)..... | 63 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 2.1.1 Technische Daten des CFM56-5C (CFMI) | 3 |
| Tabelle 2.3.1 Material der Schaufeln des Hochdruckverdichters [LHT Training] | 6 |
| Tabelle 2.5.1 Einflussgrößen auf den Tipspalt | 10 |
| Tabelle 3.2.1 Gliederung der Messsonden am Prüfstand | 21 |
| Tabelle 3.2.2 Positionierung der T3-Messsonden (Austritt des HDV) [LHT] | 21 |
| Tabelle 3.2.3 Positionen der TC-Messsonden (Gehäuse der HDT) [LHT] | 22 |
| Tabelle 3.4.1 HSG-Tipspalt für 2D-Laufschaufern des CFM56-5C4 [ESM] | 24 |
| Tabelle 3.5.1 Winkel des Strömungsversatzes im HDV (T3-Positionen) | 28 |
| Tabelle 3.6.1 Winkel des Strömungsversatzes in 2. Stufe des HDV | 33 |
| Tabelle 3.8.1 Positionen der T3-Temperaturmesssonden [ESM] | 37 |
| Tabelle 3.9.1 Informationsfluss des HPTACC-Regelungssystems [LHT Training] | 38 |
| Tabelle 4.2.1 Einteilung des Hochdruckverdichters in drei Bereiche | 47 |

Formelverzeichnis

| | |
|---|----|
| Formel 2.7.1 Totaldruck | 14 |
| Formel 2.7.2 Totaltemperatur | 14 |
| Formel 2.8.1 Wirkungsgrad..... | 15 |
| Formel 2.8.2 isentroper Verdichterwirkungsgrad..... | 15 |
| Formel 2.8.3 polytroper Verdichterwirkungsgrad..... | 16 |
| Formel 3.2.1 TCRingRat | 22 |
| Formel 3.6.1 Koordinatentransformation | 32 |
| Formel 3.7.1 Komponentenzerlegung (Exzentrizität)..... | 36 |
| Formel 3.7.2 Spalt aus Exzentrizität..... | 36 |
| Formel 3.8.1 Berechnung der relativen Temperaturen am Austritt des HDV..... | 37 |
| Formel 4.3.1 HDT-Gehäusetemperatur | 58 |

Literaturverzeichnis

- [Bräunling] Bräunling, Willy J.G., „Flugzeugtriebwerke“, 3. überarbeitete Auflage, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 2009
- [CFMI] CFM International, CFM56, URL: www.cfm56.com/products/cfm56-5c, Februar 2012
- [ESM] Engine Shop Manual CFM56-5C, Lufthansa Technik AG 2012
- [LHT] Lufthansa Technik, interne Daten zur Untersuchung des CFM56-5C4
- [LHT Training] Lufthansa Technik Training, interne Schulungsunterlagen, 2009
- [Schulze] Schulze, Detlef, „Vorlesungsskript - Aerodynamik mit Labor“, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Auflage Sommersemester 2010