

1 Einleitung

Die Europäische Kommission veröffentlichte im Jahr 2011 eine Roadmap unter dem Titel „Flightplan 2050 – Europe's Vision for Aviation“, in welcher unter anderem ökologische Ziele für die zivile Luftfahrt festgelegt und quantifiziert wurden. Insbesondere die Senkungen der CO₂-Emissionen um 75 % und der NO_x-Emissionen um 90 % stellen hohe Anforderungen an die verfügbaren Technologien und Prozesse in der Luftfahrtindustrie [EURO11]. Möglichkeiten zur Steigerung des Turbinenwirkungsgrads und damit zur Reduzierung des Treibstoffverbrauchs sind unter anderem die Erhöhung des Nebenstromverhältnisses des Triebwerks sowie des Gesamtdruckverhältnisses des Verdichters. Der Zusammenhang zwischen Nebenstromverhältnis und spezifischem Brennstoffverbrauch sowie die Entwicklung des Verhältnisses in den vergangenen Jahren ist in Abbildung 1-1 links dargestellt.

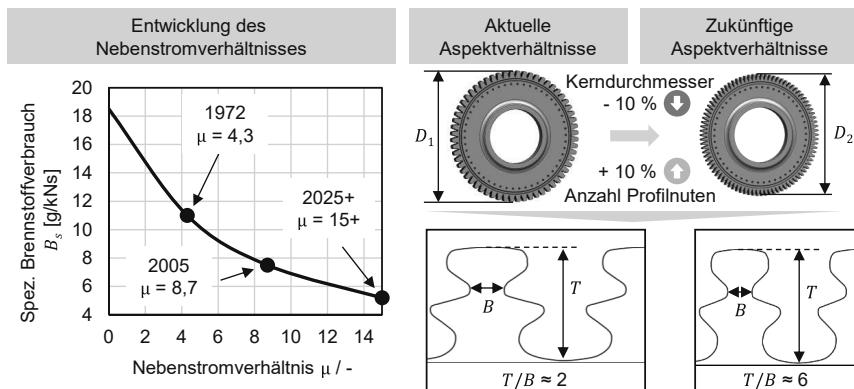


Abbildung 1-1: Entwicklung des Nebenstromverhältnisses und der Bauteilgeometrie in Flugzeugtriebwerken [ROLL15]

Development of the Bypass Ratio and Workpiece Design in Aircraft Engines [ROLL15]

Das Nebenstromverhältnis eines Mantelstromtriebwerkes beschreibt dabei das Verhältnis aus den zwei Luftströmen, welche am Kerntriebwerk vorbei und durch dieses hindurch strömen. Eine konkrete konstruktive Maßnahme zur Erhöhung dieses Verhältnisses, welche auch in aktuellen Entwicklungen sichtbar ist, ist eine Verkleinerung des Kerntriebwerkurdurchmessers zur effizienteren Aufteilung der beiden Luftströme. Eine weitere konstruktive Maßnahme zur Erhöhung des Wirkungsgrades des Triebwerks ist eine Erhöhung der Beschaufelungsdichte der einzelnen Turbinenstufen, d.h. eine Vergrößerung der Anzahl der über den Scheibenumfang positionierten Turbinenschaufeln [ROLL15]. Dabei bewirkt eine engere Beschaufelungsdichte, dass innerhalb der Turbine ein größerer Anteil des statischen Drucks in kinetische Energie umgewandelt wird und bei optimierter Auslegung die Anzahl an Verdichter- und Turbinenstufen und damit das Gewicht reduziert werden kann. Die Folge beider Maßnahmen ist eine

Verkleinerung der Komponenten im Kerntriebwerk, z.B. der rotierenden Turbinenscheiben. Aufgrund der hohen thermischen, mechanischen und chemischen Belastungen, welchen die Komponenten im Betrieb ausgesetzt sind und der enormen Sicherheitsrelevanz müssen auch zukünftig enge Toleranzgrenzen bei der Fertigung eingehalten werden. Durch die Verkleinerung der zu fertigenden Strukturen und den gleich bleibenden Toleranzanforderungen werden immer größere Herausforderungen an den Fertigungsprozess von sicherheitskritischen Bauteilmerkmalen gestellt.

Im Fokus dieser Forschungsarbeit steht die Schnittstelle zwischen den Turbinenschaufeln und der Turbinenscheibe, welche hohen Belastungen unterliegt und folglich besondere Sicherheitsmaßstäbe zu erfüllen hat. Die Fixierung der Turbinenschaufeln erfolgt bei den modular aufgebauten Stufen des Hochdruckverdichters und -turbine formschlüssig über sogenannte Schwälbenschwanz- oder Tannenbaumprofilnuten. Die komplexen Profile werden nach aktuellem Stand der Technik nahezu ausschließlich mittels des spanenden Fertigungsverfahrens Räumen gefertigt. Das Räumen ist gekennzeichnet durch eine hohe Produktivität und Genauigkeit. Die dargestellten konstruktiven Entwicklungen innerhalb der Turbine führen zu einer Verkleinerung der tragenden Strukturen. Bezogen auf die Turbinenscheibe zeigt sich diese Entwicklung insbesondere in einer Vergrößerung des Aspektverhältnis aus minimaler Stegbreite B und Tiefe T der Profilnut (vgl. Abbildung 1-1 rechts). Der geringere Querschnitt resultiert in einer reduzierten Steifigkeit des Werkstücks, wodurch elastische Deformationen im Fertigungsprozess begünstigt werden. Diese Verkleinerung können wiederum zu geometrischen Abweichungen an den Funktionsflächen der jeweiligen Profilnuten führen, welche aus strukturmechanischen Gesichtspunkten zu einer Beeinträchtigung der Kraftübertragung zwischen Schaufel und Turbinenscheibe führt. Insbesondere bei sicherheitskritischen Bauteilen sind die Form- und Lagegenauigkeit an Funktionsflächen eng toleriert und daher eins der entscheidenden Qualitätsmerkmale. Bei anderen Fertigungsverfahren, wie beispielsweise dem Drehen oder dem Fräsen, kann im Anschluss an eine KMG-Messung eine Maßkompenstation über Korrekturwerte im CAM-Programm durchgeführt werden. Diese iterative Prozessauslegung bis zum Erreichen der geforderten Maßhaltigkeit ist beim Räumen aufgrund der vordefinierten Werkzeuggeometrie und der eingeschränkten Prozesskinematik nicht möglich. Eine Prädiktion der erzielbaren Maßhaltigkeit für sicherheitskritische und kostenintensive Bauteile ist daher umso wichtiger um den Fertigungsprozess effizient auslegen zu können.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der empirischen Analyse sowie der analytischen Modellierung der mechanisch- und thermisch-bedingten elastischen Bauteilverformung während der Räumbearbeitung. Das Ziel ist die Ableitung eines generischen Vorgehens zur Prädiktion der erzielbaren Maßhaltigkeit der gefertigten Werkstückgeometrie. Anschließend werden Handlungsmaßnahmen hinsichtlich der Werkzeug- und Prozessauslegung zur Reduktion der Geometrieabweichungen abgeleitet, sodass auch zukünftig die steigenden Toleranzanforderungen aufgrund der aktuellen Entwicklungen in der Triebwerksindustrie durch das Fertigungsverfahren Räumen erfüllt werden können.

Introduction

In 2011, the European Commission published a roadmap entitled "Flightplan 2050 - Europe's Vision for Aviation", in which, among other things, economic targets for civil aviation were defined and quantified. In particular, the reductions of 75% in CO₂ emissions and 90% in NOx emissions place high demands on the available technologies and processes in the aviation industry [EURO11]. Possibilities for increasing turbine efficiency and thus reducing fuel consumption include increasing the bypass ratio of the engine and the overall pressure ratio of the compressor. The relationship between bypass ratio and specific fuel consumption and the development of the ratio in recent years is shown in Figure 1-2 on the left.

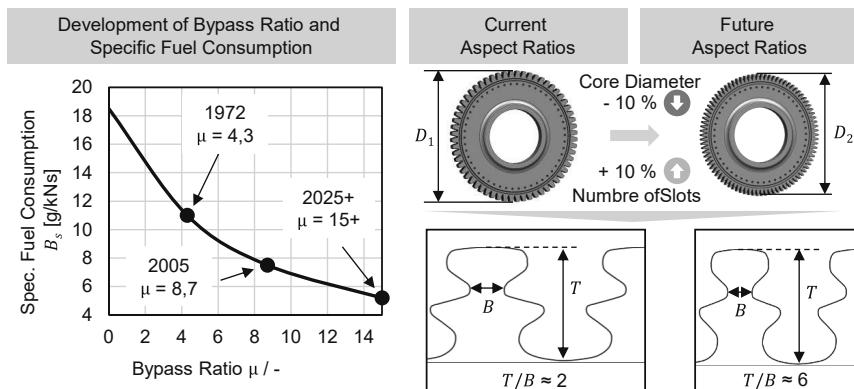


Figure 1-2: Recent Developments in Aircraft Engines [ROLL15]

Aktuelle Entwicklungen in Flugzeugtriebwerken [ROLL15]

The bypass ratio of a turbofan engine describes the ratio of the two air streams flowing besides and through the core engine. One specific design measure for increasing this ratio, which is also visible in current developments, is a reduction in the diameter of the core engine to divide the two air streams more efficiently. Another design measure to increase the efficiency of the engine is to increase the blading density of the individual turbine stages, i.e. to increase the size of the turbine blades positioned around the circumference of the disk [ROLL15]. The effect of a closer blading density is that a larger proportion of the static pressure is converted into kinetic energy within the turbine and, with an optimized design, the number of compressor and turbine stages and thus the weight can be reduced. The consequence of both measures is a miniaturization of the components in the core engine, e.g. the rotating turbine disks. Due to the high thermal, mechanical and chemical stresses to which the components are subjected during operation and their enormous relevance to safety, tight tolerance limits will have to be maintained during production in the future as well. Due to the miniaturization of the structures to be manufactured and the constant tolerance requirements, ever greater challenges are being placed on the manufacturing process for safety-critical component features.

The focus of this research work is the interface between the turbine blades and the turbine disk, which is subject to high loads and consequently has to meet special safety standards. In the modular stages of the high-pressure compressor and turbine, the turbine blades are fixed form-fitted by means of dovetail or fir-tree profile grooves. The complex profiles are manufactured almost exclusively by means of the broaching machining process in accordance with the current state of the art. Broaching is characterized by high productivity and accuracy. The design developments described within the turbine lead to a reduction in the size of the load-bearing structures. In relation to the turbine disk, this development is reflected in particular in an increase in the aspect ratio of minimum web width B and depth T of the profile groove (see Figure 1-2 right). The smaller cross section results in a reduced stiffness of the workpiece, which favors elastic deformations during the manufacturing process. This can result in geometric deviations at the functional surfaces of the respective profile grooves, which from a structural-mechanical point of view leads to an impairment of the power transmission between blade and turbine disk. Particularly in the case of safety-critical components, the form and positional accuracy on functional surfaces are closely toleranced and are therefore one of the decisive quality characteristics. In other manufacturing processes, such as turning or milling, dimensional compensation can be performed via correction values in the CAM program following a CMM measurement. This iterative process design until the required dimensional accuracy is achieved is not possible with broaching due to the fixed tool geometry and the limited process kinematics. Predicting the achievable dimensional accuracy for safety-critical and cost-intensive components is therefore all the more important.

The focus of this work is on the empirical analysis and analytical modeling of the mechanically and thermally induced elastic component deformation during broaching. The objective is the development of a design model for the prediction of the achievable dimensional accuracy of the manufactured workpiece geometry. Subsequently, measures for the reduction of geometrical deviations are derived with regard to tool and process design, so that the increasing tolerance requirements due to the current developments in the engine industry can also be met by the broaching manufacturing process in the future.