



Leseprobe

Wolfgang Bergmann

Werkstofftechnik 2

Teil 2: Anwendung

ISBN: 978-3-446-41711-3

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser.de/978-3-446-41711-3>

sowie im Buchhandel.

an der schwierigeren Herstellung und andererseits an dem Umstand, dass höhere Festigkeitswerte nur zu Lasten verminderter Risszähigkeit erlangt werden konnten und die zugehörigen kritischen Risslängen von 0,5 mm und kleiner mit den Verfahren der zerstörungsfreien Fehlerprüfung nicht mehr sicher nachgewiesen werden konnten. Dies aber wäre für einen „safe life“-Betrieb des Fahrwerks ohne jegliche Redundanzen unbedingt erforderlich gewesen.

Wie schon erwähnt stellen im Festigkeitsbereich bis etwa $1\,000\text{ N/mm}^2$ die korrosionsbeständigen **Ti-Legierungen** höherer Festigkeit (z. B. α/β : TiAl6V6Sn2, β : TiV10Fe2Al3) eine gewichtsspezifisch günstigere Alternative zu Stählen gleicher Festigkeit dar, für geringer beanspruchte Fahrwerksteile wie z. B. Arretierstreben können sogar Al-Werkstoffe in Betracht kommen.

6.1.3 Triebwerk

6.1.3.1 Funktionsweise

Der Funktionsweise eines Turbostrahltriebwerks liegt das Rückstoßprinzip zugrunde. Es saugt mit einem Frontgebläse (Fan) Luft an, die beim Durchströmen eines mehrstufigen Nieder- und Hochdruck-Turboverdichters auf ein Vielfaches verdichtet wird. In die am **Verdichtende** auf über 20 bar komprimierte und hierdurch auf ca. $600\text{ }^\circ\text{C}$ erhitzte Luft wird in einer sich anschließenden **Brennkammer** Brennstoff eingespritzt, der kontinuierlich verbrennt. Das bei der Verbrennung auf nahezu $2\,000\text{ }^\circ\text{C}$ erhitzte Rauchgas treibt eine wiederum mehrstufige **Gasturbine** mit Hoch- und Niederdruckteil (Abb. G.6-7).

Hinter der Turbine wird das expandierende Rauchgas in einer **Schubdüse** beschleunigt und mit hoher Geschwindigkeit aus dem Triebwerk ausgestoßen. Der durch diesen Impuls hervorgerufene Schub verleiht dem Flugzeug die zum Fliegen erforderliche Geschwindigkeit. Der aus der Schubdüse austretende so genannte Hauptstrom trägt aber nicht allein zum Schub des Triebwerks bei, sondern zu einem beträchtlichen Teil auch der nur vom Fan-Gebläse beschleunigte so genannte Nebenstrom. Bei modernen Triebwerken nimmt dieser Anteil sogar erheblich zu. Die Aufgabe der Turbine besteht lediglich im Antrieb von Fan und Verdichter sowie notwendiger Hilfsaggregate. Überschallflugzeuge besitzen hinter der Turbine noch einen so genannten Nachbrenner, um für bestimmte Flugzustände kurzfristig eine sehr hohe Schubleistung zur Verfügung stellen zu können. Im Nachbrenner wird in das noch O_2 -haltige Rauchgas erneut Brennstoff eingespritzt und verbrannt. Hierdurch wird eine Schubverdoppelung bei allerdings hohem Brennstoffverbrauch möglich.

Obwohl für einen hohen Wirkungsgrad des Triebwerks auch möglichst hohe Gastemperaturen anzustreben sind, müssen die vor allem in der Brennkammer entstehenden Gastemperaturen mit Rücksicht auf die begrenzte Warmfestigkeit und Temperaturbeständigkeit der verfügbaren Werkstoffe durch Kühlung mit Verdichterluft künstlich so gesenkt werden, dass an mechanisch beanspruchten und meist ebenfalls gekühlten

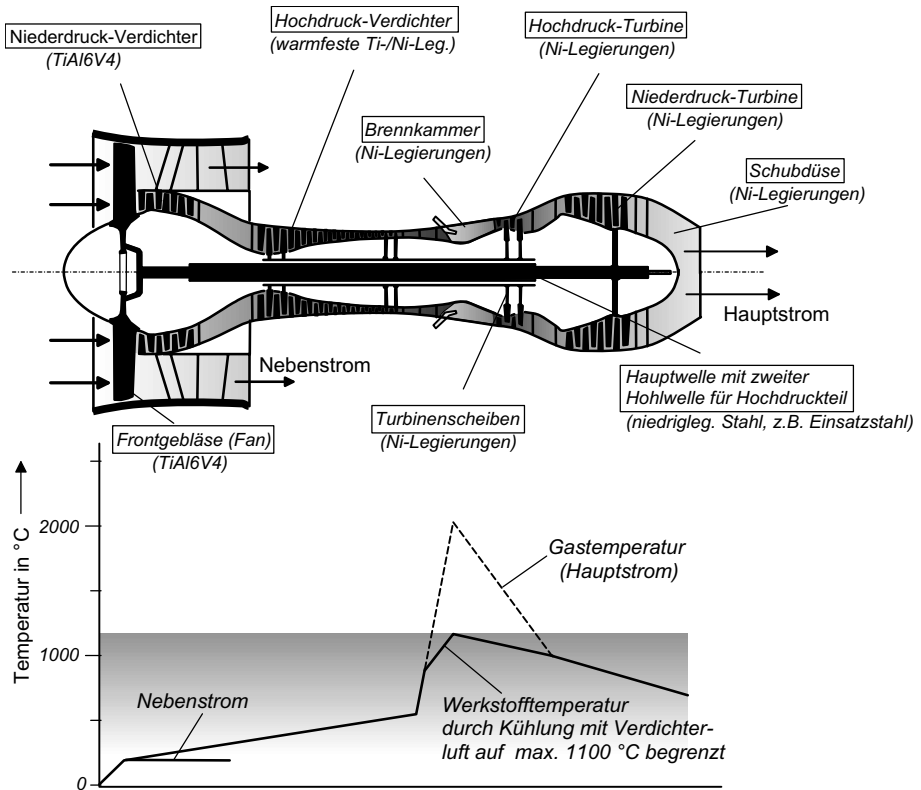


Abb. G.6-7 Flugtriebwerk (schematisch, nach MTU)
Baugruppen, Werkstoffe, Betriebstemperaturen

Teilen maximale Werkstofftemperaturen von etwa $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf Dauer nicht überschritten werden. Die umlaufenden, fliehkraft-beanspruchten Laufschaufeln der 1. Stufe der Hochdruckturbine unmittelbar hinter der Brennkammer wie auch die zugehörigen und feststehenden Leitschaufeln stellen die vor allem thermisch höchstbelasteten Teile eines Triebwerks dar. Die notwendige **Kühlung** der Schaufeln mit Verdichterluft geschieht über teils recht komplizierte Hohlräume durch das Schaufelinnere hindurch (Abb. G.6-8). Scheiben, an denen diese Schaufeln befestigt sind, werden dagegen mehr mechanisch beansprucht.

Die so genannte Filmkühlung, bei der die Luft durch eine Reihe von Bohrungen aus der Schaufel austretend außen einen schützenden Kühlfilm bildet, der langsam vom Abgas aufgelöst und verwirbelt wird, übt dabei eine besonders effektive Kühlwirkung aus. Noch wirkungsvoller wäre die so genannte Effusionskühlung. In diesem Fall besteht die Schaufel aus einer äußeren porösen Keramikschale, die von einem inneren Metallkern mit Kühlkanälen getragen wird. Die Kühlluft tritt sehr gleichmäßig durch

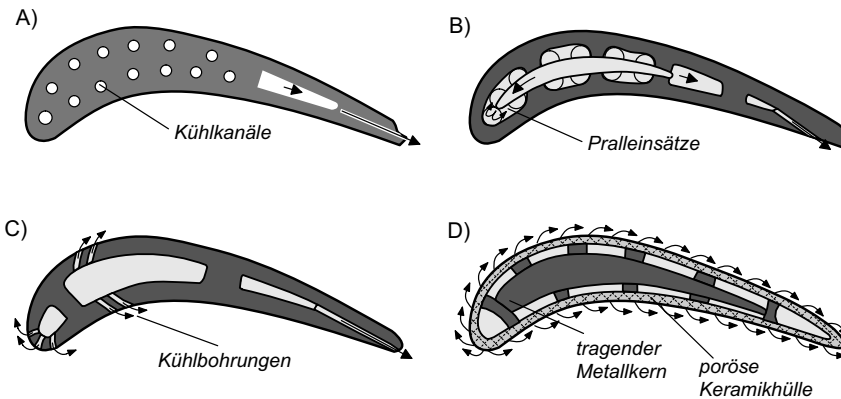


Abb. G.6-8 Luftkühlung von Gasturbinenschaufeln (nach MTU)

A) Innenkühlung, B) Prallkühlung, C) Filmkühlung, D) Effusionskühlung

die Poren der Keramikschale. Die Effusionskühlung ist allerdings noch nicht zur Serienreife entwickelt.

Es werden aber nicht nur die thermisch hochbeanspruchten Schaufeln gekühlt, sondern das gesamte Triebwerk wird auf komplexe und sinnvolle Weise von Kühlluft durchströmt und temperiert, sodass z. B. im Triebwerkszentrum im Bereich der Wellen und Lagerungen nur Temperaturen um $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ herrschen und die Anwendung ganz normaler Wellen- und Lagerwerkstoffe möglich wird.

6.1.3.2 Hochtemperaturbeanspruchungen

Die Beanspruchung der dem Luft- bzw. Rauchgasstrom ausgesetzten Triebwerkskomponenten setzt sich aus einem **thermisch-mechanischen** und einem **oxidativ-korrosiven** Anteil zusammen.

Temperaturen bis etwa $0,4 \cdot T_s$ bewirken lediglich einen temperaturabhängigen Abfall der mechanischen Kennwerte, sodass als Dimensionierungswert eine entsprechende Warmstreckgrenze zugrunde zu legen ist. Oberhalb von $0,4 \cdot T_s$ kommt es jedoch zu thermisch aktivierten Umlagerungsprozessen, die bei konstanter Spannung zeitabhängiges Kriechen (Retardation), bei konstanter Dehnung zeitabhängigen Spannungsabbau (Relaxation) nach sich ziehen. Der Kriechvorgang beruht auf zwei unterschiedlichen Mechanismen, einem thermisch aktivierten **Versetzungskriechen** bei höheren Spannungen und entsprechend niedrigeren Temperaturen und einem **Diffusionskriechen** bei höheren Temperaturen und entsprechend niedrigeren Spannungen. Beim Versetzungskriechen führen Kletter- und Quergleitprozesse aufgestauter Versetzungen zur zeitabhängigen Weiterverformung, beim Diffusionskriechen kommt es durch spannungsinduzierte atomare Diffusionsströme von einer Kornseite zur anderen und durch Korngrenzgleiten entlang von Korngrenzen zu Kornverformungen in Beanspruchungsrichtung (vgl. B 2.1.4.1/2.2.4). Mit zunehmender **Korngröße** (!), d. h. weniger

Korngrenzen und längeren Diffusionswegen, vermindert sich die Kriechgeschwindigkeit bzw. steigt der Kriechwiderstand an.

Außer durch Kriechen können Schaufeln auch durch Thermoermüdung, Oxidation (Verzunderung) und/oder Korrosion (Heißgas-) versagen. Obwohl die Schaufelwerkstoffe selbst über ein beträchtliches Maß an Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit verfügen, bedarf es doch in bestimmten Temperaturbereichen zusätzlicher Schutzbeschichtungen (vgl. G 1.2.3).

6.1.3.3 Werkstoffe

Die beiden wichtigsten Werkstoffgruppen für den Bau von Flug-Gasturbinen sind für den Temperaturbereich bis 550 (600) °C **Ti-Legierungen** (Verdichter, Schubumkehrer) und für den Temperaturbereich 600 bis 1 100 °C **Ni-Legierungen** (Verdichter, Turbine, einschließlich Brennkammer, Schubdüse).

Für Scheiben des Niederdruckverdichters wird überwiegend die zweiphasige (α + β) Standardlegierung TiAl6V4 (kurz: 6-4) gewählt, die sich durch hohe Festigkeit, gute Kriechfestigkeit bis ca. 300 °C sowie gute Verarbeitungseigenschaften (z. B. Schweißbarkeit) auszeichnet.

Für **Verdichterschaufeln** und zu höheren Temperaturen hin kommen unterschiedliche Ti-Legierungen zum Einsatz, die überwiegend aus der warmfesteren und oxidationsbeständigeren hexagonalen α -Phase („Nah- α “), z. B. TiAl6Sn2Zr4Mo2 (6-2-4-2) bestehen. Die mechanischen Eigenschaften von Ti-Legierungen werden in hohem Maße von ihrer chemischen Zusammensetzung und den mithilfe ausgeklügelter thermischer und thermomechanischer Behandlungen erzielbaren Gefügeausbildungen beeinflusst. Neuere **Nah- α** -Legierungen enthalten ca. 5 bis 6 % Al, je 3 bis 4 % Zr und Sn, 0,3 bis 0,4 % Si sowie 0,5 bis 1 % Mo bzw. Nb. Eine besondere, das Klettern von Versetzungen behindernde Rolle spielt dabei der Si-Zusatz. Zur Zeit werden in den meisten Triebwerken die letzten beiden Stufen des Hochdruckverdichters wegen der dann auf 600 °C angestiegenen Lufttemperatur noch aus schweren Ni-Legierungen hergestellt. In Einzelfällen sind aber auch diese beiden Stufen unter beachtlicher Gewichtseinsparung mit weiter optimierten Nah- α -Legierungen (IMI 834, Ti-1100) bestückt worden. Zu beachten bleibt, dass Ti-Schaufeln oberhalb von 540 °C eine Schutzbeschichtung gegen Oxidation benötigen und dass mit dem hohen Anteil an hexagonaler α -Phase im Vergleich zu TiAl6V4 eine deutliche Einbuße an Duktilität und Verarbeitbarkeit verbunden ist. Die Lebensdauer von Ti-Schaufeln im Temperaturbereich über 540 °C hängt also von der Bewährung des Oxidationsschutzes ab. Zur Zeit scheint jedoch mit der Einsatztemperatur von max. 600 °C für die konventionellen Nah- α -Legierungen wegen stark abnehmenden Kriechwiderstandes und massiv einsetzender Oxidation des Ti-Gitters eine kaum noch veränderbare Entwicklungsgrenze erreicht worden zu sein.

Entwicklungsmöglichkeiten zu höheren Betriebstemperaturen hin werden in zweierlei Hinsicht gesehen. Zum einen durch mit warmfesten Oxiden wie Y₂O₃, Er₂O₃ disper-