

Projektbericht

Projektseminar

„Werkstoffauswahl in der additiven Fertigung“

von

| Name | Vorname | Matrikelnr. | Studiengang | Semester |
|--------------------|---------|-------------|----------------|----------|
| Nayaimy | Najim | 03718317 | Maschinenwesen | |
| Naffeti | Yassine | 03712599 | Maschinenwesen | |
| Virto Chirhuana | Gabriel | 03732192 | Maschinenwesen | |
| | | | | |

Werkstoffauswahl und Analyse einer Turbinenschaufel in der Hochdruckturbinen- des Triebwerks IAE V2500

betreuender Assistent: Betreuer

Start des Projektseminars: Datum

abgegeben am: Datum

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Motivation und Einleitung..... | 3 |
| 2 | Stand der Technik | 4 |
| 3 | Experimente und Methoden..... | 8 |
| 4 | Ergebnisse und Diskussion..... | 17 |
| 5 | Zusammenfassung und Ausblick..... | 26 |
| | Literaturverzeichnis..... | 28 |
| | Anhang | 32 |

1 Motivation und Einleitung

1.1 Motivation

Die vorliegende Seminararbeit befasst sich mit der Werkstoffauswahl und Analyse einer Turbinenschaufel. Besonderes Augenmerk wird auf den High-Bypass-Turbofan IAE V2500 gelegt. Zunächst wird allgemein auf die Funktionsweise eines Mantelstromtriebwerks eingegangen. Im Anschluss werden aus den Betriebsumständen und den Belastungen wichtige Werkstoffeigenschaften ermittelt, die dann bei der Werkstoffauswahl mit Ansys Granta berücksichtigen werden. Zusätzlich wird eine Stömungs- und Wärmesimulation durchgeführt, um Belastungen anschaulich darzustellen und technische Kennwerte auszurechnen. Abschließend wird ein Werkstoff in der Feinauswahl festgelegt und für diesen eine passende Additive Fertigungsmöglichkeit ermittelt.

1.2 Einleitung

Gasturbinen sind heutzutage aufgrund ihrer hohen Leistungsdichte sowie ihrer flexiblen Bauweise in unterschiedlichen Leistungsklassen weit verbreitet. Sie finden als Antrieb in der Schiff- und Luftfahrt sowie für die Wärme- und Stromversorgung als stationäre Gasturbinen Anwendung. Die wichtigsten Turbinenelemente sind die Turbinenschaufeln. Sie sind die Hauptelemente, die die Druckenergie des Arbeitsmediums in kinetische Energie umwandeln. Turbinenschaufeln sind im Inneren einer Gasturbine sehr fordernden Umgebungen mit hohen mechanischen, thermischen und chemischen Belastungen ausgesetzt. Alle drei dieser Faktoren können zu Schaufelausfällen führen und möglicherweise das Triebwerk zerstören, daher werden Turbinenschaufeln sorgfältig konstruiert, um diesen Bedingungen standzuhalten. Darüber hinaus spielt der Werkstoff einer Turbinenschaufel eine wichtige Rolle, daher konzentriert sich die Untersuchung darauf, eine Legierung oder ein Material zu finden, das hohe Temperaturen, Geschwindigkeiten und Drücken ertragen kann, um eine bessere Leistung zu erzielen. Bislang werden die schaufeln durch Schmieden oder Gießen hergestellt, bei der gusstechnischen Fertigung ist ein aufwendiger Formenbau notwendig, welcher zeitintensiv und teuer ist. Dank des 3D Drucks konnte ein Team von SIEMENS diese Faktoren eliminieren und die Zeit vom Entwurf bis zur Produktion einer neuen Gasturbinenschaufel um 90% von zwei Jahren auf zwei Monate reduzieren. [1] Additive Manufacturing (AM) ist ein innovatives Fertigungsverfahren, das neue Möglichkeiten für Forschung und Industrie eröffnet und in Bezug auf Flexibilität und Gestaltungsfreiheit, insbesondere bei der Herstellung von Prototypen und der Steigerung der Serienfertigung, ein enormes Potential hat.

2 Stand der Technik

2.1 Nebenstromtriebwerk (High-Bypass Turbofan Engine)

Die Zahl der jährlichen Flüge nahm in den Jahren vor der Corona-Krise fortlaufend zu – knapp 47 Millionen Flüge gab es in der weltweiten Luftfahrt im Jahr 2019. Im Jahr 2020 ging die Anzahl der weltweiten Flüge aufgrund der Corona-Pandemie allerdings auf etwa 22 Millionen zurück und lag 2021 bei immer noch nur knapp 26 Millionen [2], damit gehört die moderne Luftfahrt zu den Stützpfeilern einer globalisierten Welt und ist aus modernen Logistikketten nicht mehr wegzudenken. Maßgeblich zu dieser Entwicklung hat die Umstellung von Propellertriebwerken zu Turbofantriebwerken (auch Mantelstromtriebwerk genannt) geführt, da besonders hinsichtlich Leistung, V_{\max} und Lärmemissionen Mantelstromtriebwerke den Propellertriebwerken deutlich überlegen sind. Im Folgenden soll nun näher auf die Funktionsweise von Nebenstromtriebwerken eingegangen werden. Allgemein ist ein Nebenstromtriebwerk aus Lufterlauf, Kompressor, Brennkammer, Turbine und Schubdüse zusammengesetzt.

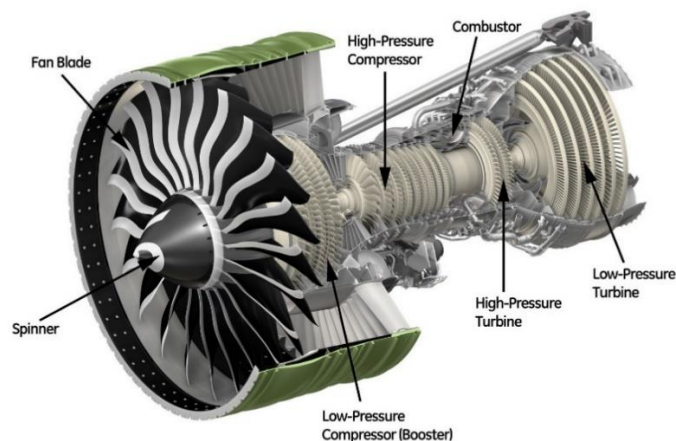


Abbildung 2.1 Querschnitt eines Mantelstromtriebwerks [4]

Nachdem am Einlauf Luft in das Triebwerk eingesaugt wurde, wird diese vom Fan (Bläser) beschleunigt und als Nebenstrom, am restlichen Triebwerk vorbei, nach hinten ausgestoßen, was für den Hauptteil des Schubs sorgt. Im Innenbereich wird der restliche Luftstrom zunächst im Axialverdichter, zusammengesetzt aus Niederdruck- und Hochdruckverdichter, komprimiert und abgebremst. Im Anschluss wird in der Brennkammer dem verdichteten Luftstrom Treibstoff beigefügt und entzündet, um eine starke Temperaturerhöhung und Beschleunigung des Kernstroms zu erzielen. Danach folgt die Turbine, bestehend aus Hochdruck und Niederdruckturbinen, bei der dem Luftstrom Geschwindigkeit entzogen wird, um diese in elektrische Leistung umzuwandeln. Die generierte Leistung treibt Fan und Verdichter an. Zum Schluss wird mittels der am Triebwerksende befindlichen Düse die verbleibende Energie des Kernstroms in Schubkraft umgewandelt. [3]

Wie bereits kurz erwähnt zeichnen sich moderne Mantelstromtriebwerke durch ihre hohe Treibstoffeffizienz und dadurch niedrigen Emissionsausstoß aus. Das Nebenstromverhältnis moderner Triebwerke, welches angibt wie hoch der Anteil der Luft ist, der an der Brennkammer vorbei strömt, hat sich von 2:1 bei ersten Serienmodellen über 6:1 für kommerzielle Triebwerke aus den 1980er wie dem IAE V2500 bis zu 12:1 für moderne aktuelle Getriebefans (GTF) entwickelt, dabei geht ein höheres Nebenstromverhältnis mit einem höheren Wirkungsgrad des Triebwerks einher. [5] Dieser Trend kommt vor allem dadurch zu Stande, dass sowohl immer höhere Temperaturen in der Brennkammer als auch höhere Drücke im Kompressor zum Einsatz kommen und zusätzlich erhöht sich auch die Größe des Triebwerks mit jeder neuen Generation. All diese Entwicklungen sind den Fortschritten in der Materialwissenschaft geschuldet, die einen Einsatz von immer leichteren, korrosionsbeständigeren und härteren Werkstoffen ermöglichen. Außerdem führen Verbesserungen in der Kühlung der Bauteile zu einer Steigerung des Wirkungsgrads, so ist der Bottleneck für die Betriebstemperatur in der Brennkammer die Hitzebeständigkeit der Turbinenschaufeln. Bei modernen Mantelstromtriebwerken findet die Kühlung der Schaufeln mithilfe von Kühlluftbohrungen, sogenannten Diffusoren, statt. Während in der Vergangenheit konventionelle mechanische Werkzeuge wie CNC-Maschinen zur Fertigung der Kühlkanäle üblich waren, gibt es nun auch die Möglichkeit mittels Ultrakurzpuls-Laser feinere Kühlgeometrien herzustellen und dank dem Einsatz von modernen CFD-Programmen ist somit eine Optimierung der Kühlung und damit eine Verbesserung des Wirkungsgrades möglich. [6]

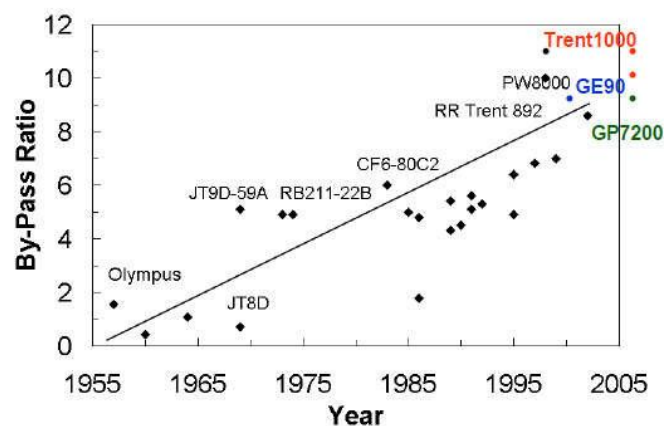


Abbildung 2.2 Entwicklung des Nebenstromverhältnisses im Lauf der Zeit [7]

Neben wirtschaftlichen Faktoren wie der Verringerung des Treibstoffverbrauchs, spielt aber auch die Reduktion von Lärmemissionen durch das Triebwerk eine immer größere Rolle in der kommerziellen Luftfahrt. Ein großer Teil des Lärms bei High-Bypass Turbofan Triebwerke entsteht durch die Interaktion des Nachlaufstroms des Fans mit den stromabwärts liegenden Statorschaufeln, um eine Verringerung der Schallemissionen zu erreichen kommen neue Triebwerkstypen wie der sogenannte Getriebefan zum Einsatz. Dabei findet eine Optimierung der Drehzahlbereiche des Fans, Verdichters und der Turbine statt, indem zwischen Fan und Verdichter ein Getriebe eingebaut wird. Folglich kommt es zu einer teilweisen Verschiebung der Lärmemissionen in den hochfrequenten Bereich, der außerhalb

des menschlichen Hörbereichs liegt, wodurch die Lärmbelastung erheblich gesenkt wird. Andere Vorgehensweisen zur Reduktion des Lärms sind der Einsatz von Trent-Triebwerken oder Chevron Düsen. [8]

2.2 Konventionelle Fertigung

Bei der Formgestaltung von Triebwerkskomponenten wie Turbinenschaufeln muss bei konventioneller Fertigung immer die Herstellbarkeit der Komponenten berücksichtigt werden. Die größte Herausforderung liegt im Design der Turbinenschaufeln, da diese über eine komplexe 3D-Geometrie sowie über ein innenliegendes Kühlungssystem verfügen. Daher müssen oft mehrere Fertigungsschritte durchlaufen werden, welche abhängig von den geforderten Materialeigenschaften ausgewählt werden. Für die Prozessauswahl kann die Norm DIN 8580 einbezogen werden, weil sie eine grobe Übersicht der einzelnen Fertigungsverfahren bietet und diese nach Änderung der Form oder der Stoffeigenschaft einteilt.

| | Zusammenhalt schaffen | Zusammenhalt beibehalten | Zusammenhalt vermindern | Zusammenhalt vermehren | |
|---------------------------------|--|---|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| Änderung der Form | Hauptgruppe 1 Urformen (Form schaffen) | Hauptgruppe 2 Umformen | Hauptgruppe 3 Trennen | Hauptgruppe 4 Fügen | Hauptgruppe 5 Beschichten |
| Änderung der Stoffeigenschaften | | Hauptgruppe 6 Stoffeigenschaft ändern durch | | | |
| | | Umlagern von Stoffteilchen | Aussondern von Stoffteilchen | Einbringen von Stoffteilchen | |

Abbildung 2.3 Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 [9]

In den letzten Jahren wurden in der Luftfahrttechnik (Turbinenkomponentenbereich) neue Fertigungstechnologien entwickelt, um einige Nachteile der konventionellen Metallbearbeitung, wie Werkzeugverschleiß, mechanische Belastung, Mikrorissbildung durch Hitzeeintrag, Oxidationsschichten, usw. zu minimieren. [10] Eine der wirtschaftlichsten Möglichkeiten für die Produktion von Turbinenschaufeln ist die Präzise Elektrochemische Metallbearbeitung, auch PECM genannt. Sie ist ein hochpräzises und spannungsarmes Fertigungsverfahren, das unter dem Prinzip der Elektrolyse funktioniert. Ein Vorteil der PECM ist die gute Eignung für die Serienproduktion, da aufgrund des Fertigungsprozesses bestimmte Nachbearbeitungsschritte wie Entgraten und Polieren entfallen. [10]

Zusätzlich ist die thermische und mechanische Einwirkung im Vergleich zu herkömmlichen Fertigungsverfahren deutlich niedriger, dadurch wird eine Veränderung der Werkstoffeigenschaften verhindert. Außerdem ist auch die Möglichkeit schwer zerspanbare Werkstoffe mittels PECM zu bearbeiten von großer Bedeutung, so umfasst das Einsatzgebiet der PECM neben herkömmlichen Metallen und gehärteten Werkstoffen auch hochlegierte Werkstoffe auf Nickel oder Titanbasis.[10] Ein Beispiel in der aktuellen Industrie ist das Modell PO 100 SF von der Firma EMAG ECM GmbH, das für die Bearbeitung von Turbinenschaufeln ausgelegt ist. [11]

3 Experimente und Methoden

3.1 Anforderungen an den Werkstoff

Bei dem im Projektseminar ausgewählten Bauteil handelt es sich um eine Turbinenschaufel in der Hochdruckturbinen des IAE V2500 Triebwerks, daher werden nun im folgendem die besonderen Anforderungen an den Werkstoff diskutiert, die durch die Betriebsumstände verursacht werden.

3.1.1 Anforderungen an den Werkstoff gegeben durch thermische Belastungen

Während dem Betrieb des Triebwerks strömt das Arbeitsfluid von der Brennkammer direkt in die Hochdruckturbinen, dementsprechend beträgt die Temperatur des Luftstroms ca. 1400°C. [12] Aus technischen Datenblättern kann entnommen werden, dass die Temperatur der Bauteile innerhalb der Hochdruckturbinen bei 791.4°C liegt, hierbei ist aber zu beachten, dass es je nach Geometrie Ausrichtung Größe und anderen Faktoren des Bauteils unterschiedlich Temperatur Peaks und Valleys gibt, dies wird später im Kapitel Strömungs- und Wärmesimulation aufgegriffen. Für die Analyse zur Werkstoffauswahl wird angenommen, dass diese Schwankungen bei +/- 50°C liegen, dementsprechend muss die maximale Einsatztemperatur des Werkstoffs über 850°C liegen. Bei Betriebsumständen von 850°C spielt also die Warmfestigkeit und die Maximale Betriebstemperatur eine wichtige Rolle, damit ein Versagen des Bauteils nicht auftritt. [13]

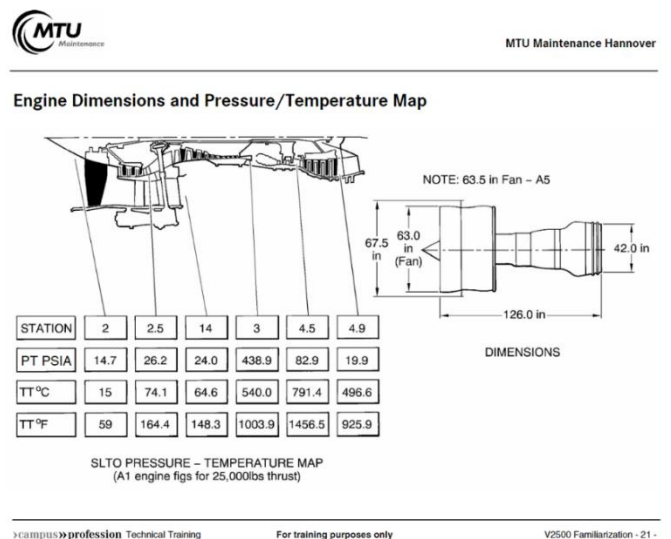
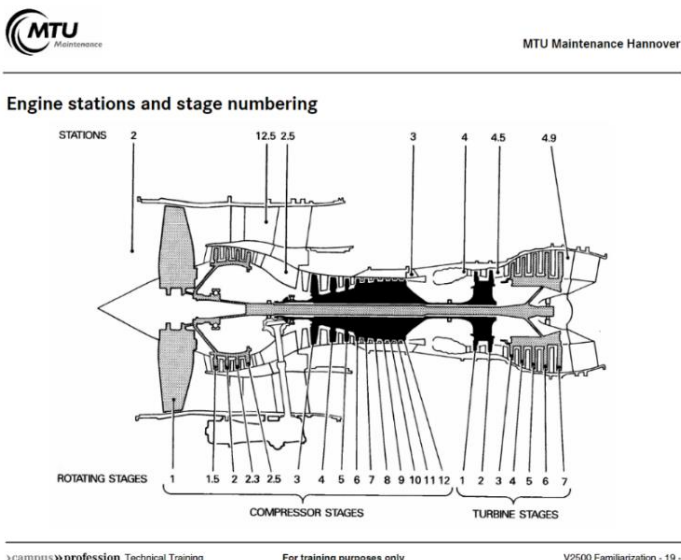


Abbildung 3.1 Temperatur und Druckverlauf innerhalb des Triebwerks [13]

„Warmfestigkeit ist die Festigkeit eines Materials bei erhöhten Temperaturen. Werkstoffe mit besonderer Warmfestigkeit werden im Bereich der keramischen Werkstoffe, der Gießereindustrie oder in der Eisen- und Stahlerzeugung bzw. -verarbeitung, aber auch in der Luftfahrt- und petrochemischen Industrie eingesetzt. Gängige Legierungselemente zur Steigerung der Warmfestigkeit von Eisen sind Cobalt (Co), Molybdän (Mo) und Vanadium (V). Legierungen, die bei 90 % der Schmelztemperatur noch strukturell belastbar (hochwarmfest) sind nennt man Superlegierung.“ [14]

Darüber hinaus kommt es bei solch hohen Temperaturen unabhängig vom Werkstoff zur thermischen Expansion des Bauteils, gleichzeitig ist aber die korrekte Funktion der Schaufel innerhalb der Turbine von ihrer Geometrie abhängig. Folglich strebt man einen Werkstoff an, der bei hohen Temperaturen eine sehr geringe Formveränderung vollzieht, relevant hierfür ist der thermische Ausdehnungskoeffizient α_T . Unter Wärmeausdehnung versteht man „[...] eine relative Größen- bzw. Längenänderung eines festen Körpers, die durch eine Temperaturveränderung bewirkt wird. Proportional zu einer Temperaturerhöhung schwingen Atome im Körper mit einer gewissen Auslenkung um ihre Ausgangslage. Durch die Erhöhung der Temperatur dehnt sich der Körper aus. Wird die Temperatur eines Festkörpers reduziert, so tritt eine Wärmeschrumpfung bzw. thermische Kontraktion ein.“ [15]

Eine Bauteiltemperatur, die knapp 550°C unter der Umgebungstemperatur liegt, kann nur mit Wärmedämmschichten, sogenannten Thermal Barrier Coatings (=TBCs), und einer ausreichenden Kühlung erreicht werden. Bei einem TBC handelt es sich um eine keramische Oberflächenschicht und einer Bindschicht zwischen der Keramik und dem eigentlichen Bauteil, dabei kann eine ca. 200µm dicke TBC Schicht eine Temperatursenkung von bis zu 150°C erreichen. [16] Zusätzlich kommen Kühlmethoden wie Single Pass Cooling und Film Cooling zum Einsatz, beim Single Pass Cooling wird aus den vorherigen Kompressorstufen des Triebwerks kühlere Luft abgezweigt und dann an relevanten Stellen durch das Bauteil gelenkt, in unserem Fall handelt es sich im CAD Modell um die Kühlkanäle die Vertikal durch die Schaufel laufen. Dagegen wird beim Film Cooling die kühlere Luft parallel zum Arbeitsfluid entlang der Schaufelwand aus kleinen Kühlkanälen ausgestoßen, um an den Außenflächen ein isolierendes Luftpolster zu bilden, welches zur Temperaturminderung beiträgt. [17] In unserem CAD-Modell ist dies nicht modelliert, da es zur Auslegung und Positionierung der Kühlkanäle eine umfangreiche Strömungsanalyse aller Turbulenzen entlang der Schaufeloberfläche benötigt und wir weder über das Wissen noch über ausreichende Ressourcen für eine derartige Auslegung verfügen. Damit aber in der Realität die genannten Kühlmethoden auch eine Wirkung zeigen, muss der Werkstoff des Bauteils eine ausreichende Wärmeleitfähigkeit besitzen.

„Die Wärmeleitfähigkeit auch Wärmeleitzahl oder Wärmeleitkoeffizient genannt, bemisst die Fähigkeit Wärme innerhalb eines Stoffes – also eines Festkörpers, eines Gases oder einer Flüssigkeit– zu transportieren“. [18]

Zusammengefasst liegt durch die thermische Belastung ein besonderer Fokus auf der maximalen Betriebstemperatur, der Warmfestigkeit, dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten und der Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffs.

3.1.2 Anforderungen an den Werkstoff gegeben durch die mechanische Belastung beim Betrieb

Während dem normalen Betrieb im Cruise Flight läuft die Turbine mit ca. 10000 U/min [19], wodurch die einzelnen Schaufelblätter enorme Zentrifugalkräfte erfahren. Einer Ermüdung des Bauteils wirkt man entgegen, indem man einen Werkstoff mit hoher Steifigkeit und hoher Zugfestigkeit einsetzt; ein wichtiger Kennwert hierfür ist das E-Modul.

„Das Elastizitätsmodul ist ein Materialkennwert aus der Werkstofftechnik, der den Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung bei der Verformung eines festen Körpers bei linear elastischem Verhalten beschreibt. Der Betrag des Elastizitätsmoduls ist umso größer, je mehr Widerstand ein Material seiner Verformung entgegengesetzt. Ein Bauteil aus einem Material mit hohem Elastizitätsmodul (z. B. Stahl) ist also steif, ein Bauteil aus einem Material mit niedrigem Elastizitätsmodul (z. B. Gummi) ist nachgiebig.“ [20]

Es ist aber noch anzumerken, dass im Betrieb eine Variation der Turbinenleistung und somit eine Variation der Belastung vorkommt, verursacht durch unterschiedliche Phasen im Flug (Take-off, Initial Climb, Climb to Cruise Altitude, Cruise, Descent, Landing). [21] Eine Werkstoffeigenschaft, die eine solche dynamische Belastung beschreibt und für die Werkstoffauswahl wichtig ist, ist die Dauerfestigkeit. Diese ist wie folgt definiert:

„In der Festigkeitslehre ist die Dauerfestigkeit ein Begriff, der die Belastungsgrenze von Werkstoffen beschreibt. Dabei bezieht sich der Begriff der Dauerfestigkeit auf die eine dynamische Belastung, wie sie beispielsweise durch Schwingungen erzeugt wird. Die Dauerfestigkeit definiert die Belastungsgrenze, bis zu der ein ausgewählter Werkstoff solche dynamischen Belastungen ohne Erscheinungen der Materialermüdung oder anderer Ausfallerscheinungen widersteht.“ [22]

Neben den Zentrifugalkräften müssen aber auch die Fluidkräfte auf die Schaufel beachtet werden, diese machen sich in Form von Torsionsspannungen im Bauteil bemerkbar, daher ist auch die Betrachtung der Torsionsfähigkeit für die Auswahl des Werkstoffs relevant. Durch den Aufbau des Triebwerks kommen die Turbinenschaufeln im Regelbetrieb nicht mit Festkörpern aus der Umgebung in Kontakt. Zusätzlich verhindert das TBC jeglichen mechanischen Abrieb am Werkstoff, daher kann die Verschleißfestigkeit für die Materialauswahl vernachlässigt werden.

3.1.3 Chemische Anforderungen

Nachdem das Arbeitsmedium aus der Brennkammer in die Turbine strömt, befinden sich Verbrennungsprodukte in der Luft. Neben der Umgebungsluft, mit vermindertem Sauerstoffanteil, befinden sich auch Wasserdampf, Stickoxide (NO_x), Schwefeldioxid (SO_2), Rußpartikel und geringe Mengen unverbranntes Kerosin im Luftstrom. Kerosin besteht hauptsächlich aus Kohlenwasserstoffen (Alkanen, Zykloalkanen, Aromaten und Olefinen). Da die Schaufelflächen mit dem Arbeitsmedium durchgehend im Kontakt sind muss sichergestellt werden, dass die genannten Stoffe keine negativen Auswirkungen auf die Funktion des Bauteils haben oder sogar korrosiv auf das Material wirken. In der Regel wird in kommerziellen Flugzeugen der Treibstoff Jet A-1 verwendet, diesem wird zur Verbesserung der Performance diverse Additive zugesetzt. Besonders Korrosionsschutzmittel und Antistatikmittel sind hier nennenswert, die eine elektrische Korrosion und eine chemische Korrosion, durch unverbrannten Treibstoff verhindern. Korrosion wird wie folgt definiert:

„DIN EN ISO 8044 beschreibt Korrosion als „physikochemische Wechselwirkung zwischen einem Metall und seiner Umgebung.“ Die dadurch veränderten Eigenschaften des Metalls führen laut DIN dazu, dass die Funktion des Metalls, dessen Umgebung oder das System, in dem es verbaut ist, erheblich beeinträchtigt werden.“ [23]

3.2 Vorauswahl und Grundwerkstoffgruppe

Eine durchschnittliche Betriebstemperatur bei ca. 800°C ist für die ausgewählte Turbinenschaufel aufgrund der Lage im Triebwerk unvermeidbar und auch die mechanischen Belastungen auf das Bauteil sind wegen der Funktionsweise der Turbine unumgänglich. Aus diesem Grund werden im ersten Schritt Grundwerkstoffgruppen ausgewählt, die diese Anforderungen erreichen, weil nur in diesem Fall eine korrekte Funktion des Bauteils gewährleistet werden kann. Konkret bedeutet das, dass alle Werkstoffe sofort ausscheiden, die einen E-Modul von 50GPa und eine maximale Betriebstemperatur von 850°C unterschreiten. Eine Analyse mit Ansys Granta liefert, dass sämtliche Polymere, Schäume, Naturwerkstoffe und die meisten Verbundwerkstoffe als Baumaterial ausscheiden. Übrig bleiben somit nur diverse Metalle und Metalllegierungen, verschiedenste Keramik Werkstoffe und einige Faserwerkstoffe.

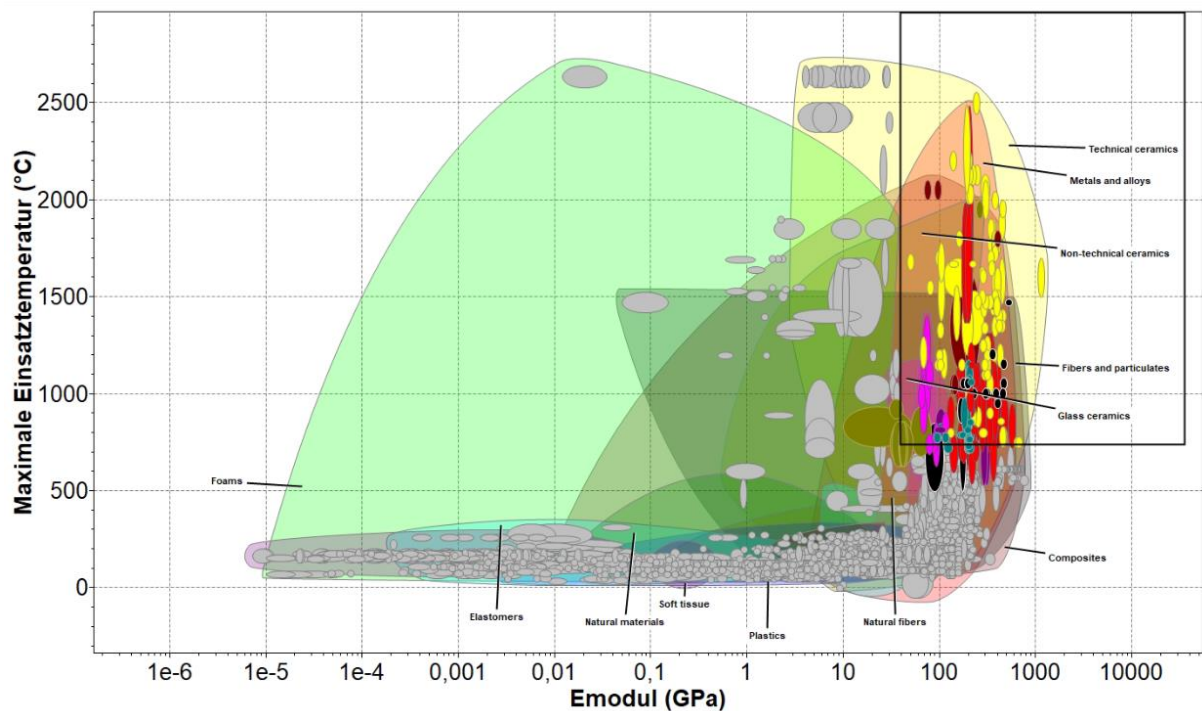


Abbildung 3.2 Gegenüberstellung von Werkstoffgruppen hinsichtlich max. Einsatztemperatur und E-Modul

Da sich diese Arbeit nur mit der Werkstoffauswahl für die additive Fertigung auseinandersetzt, kann man Nichttechnische-Keramiken, Technische-Keramiken und Faserwerkstoffe, aufgrund mangelnder Möglichkeiten diese Werkstoffe kommerziell in höheren Stückzahlen additiv zu fertigen, vernachlässigen; folglich reduziert sich die Werkstoffauswahl für die Turbinenschaufel auf die Grundwerkstoffgruppe der Metalllegierungen.

Im nächsten Schritt werden die Metalllegierungen mit ausreichender Einsatztemperatur näher betrachtet, dazu wird ein Plot verwendet, der die Zugfestigkeit und die Dichte vergleicht. Die Legierungen sind dabei unterschiedlich eingefärbt, so sind Nickelbasislegierungen Rot, Titanlegierungen Türkis, Kobaltbasislegierungen Dunkelblau, Stähle Petrol, Molybdän-Werkstoffe Grün, Tantallegierungen Gelb, Wolframlegierungen Lila, Rhenium-Werkstoffe Orange und Osmium-Werkstoffe Pink.

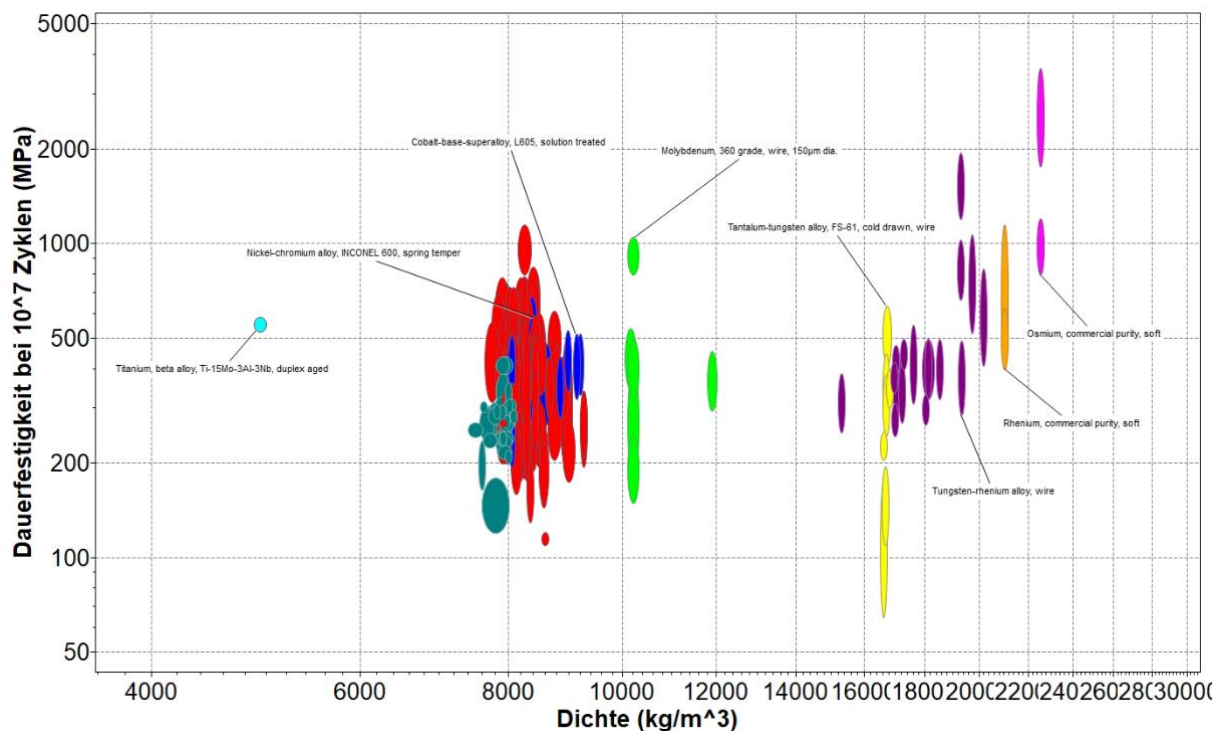


Abbildung 3.3 Gegenüberstellung von Metallgruppen hinsichtlich Dauerfestigkeit und Dichte

Es kristallisiert sich sofort heraus, dass einige Legierungsarten um ein Vielfaches dichter und somit schwerer sind als andere, so sind kommerzielle Osmium-Werkstoffe mit 22000 kg/m³ dreimal so dicht wie die meisten Nickelbasislegierung. In der Luftfahrt spielt das Gewicht der Bauteile eine große Rolle, um die Wirtschaftlichkeit der Flugzeuge beizubehalten, so bestehen Flugzeuge beispielsweise aus großen Teilen aus Aluminium, es werden besondere Lacke verwendet, um so wenig Farbe wie möglich zu verwenden etc. Weil ein kommerzieller Einsatz nicht lohnenswert ist, können also extremdichte Materialien aus der Auswahl aussortiert werden. Darunter fallen sämtliche Materialien mit einer Dichte über 10000 kg/m³ (zum Vergleich: Eisen – 7800 kg/m³, Aluminium – 2700 kg/m³), dadurch scheiden alle Molybdän-, Tantal-, Wolfram-, Rhenium- und Osmium-Werkstoffe aus. Zusätzlich setzen wir, wegen der dynamischen Beanspruchung der Schaufel, eine minimale Dauerfestigkeit von 300 MPa fest. Für die weiter Betrachtung der Werkstoffe kommen somit nur noch Nickelbasislegierungen, Kobaltbasislegierungen und wenige Stähle in Frage. Eine detaillierte Analyse von möglichen Legierungen aus den drei genannten Werkstoffgruppen und eine Auswahl erfolgt im Kapitel „Feinauswahl“.

3.3 Simulation und Analyse

Für die Turbinenschaufel wurde ein CAD-Modell erstellt, mit dem verschiedene Simulationen durchgeführt werden können, um zu untersuchen, wie sich das Bauteil unter Betriebsbedingungen verhält. Alle Simulationen wurden für den Werkstoff Inconel® 600 umgesetzt. Das Bauteil wird von außen mit einem heißen Gas bestrahlt, parallel dazu strömt innen in die Kühlkanäle ein Kühlmittel. Zur Vereinfachung der Simulation wurden einfache Single-Pass Kanäle verwendet und das TBC vernachlässigt, allerdings sind heutzutage auch neuere Kühlmethoden wie Multi-Pass Kanäle und Film-Kühlung üblich. Mittels ANSYS CFX kann der Wärmeaustausch zwischen einem heißen Fluid, der Turbinenschaufel und einem kalten Medium simuliert werden. Als Ergebnis erhält man, wie in der Abbildung 3.4 gezeigt wird, die Temperaturverteilung im Bauteil. So ist es möglich, die Temperaturbeträge innerhalb des Bauteils und den Bereich, in dem die maximale Temperatur auftritt, zu ermitteln. Mithilfe dieser Simulation wurden die noch unbekanntes Fluidkräfte des heißen Gases, die auf das Bauteil wirken, ermittelt.

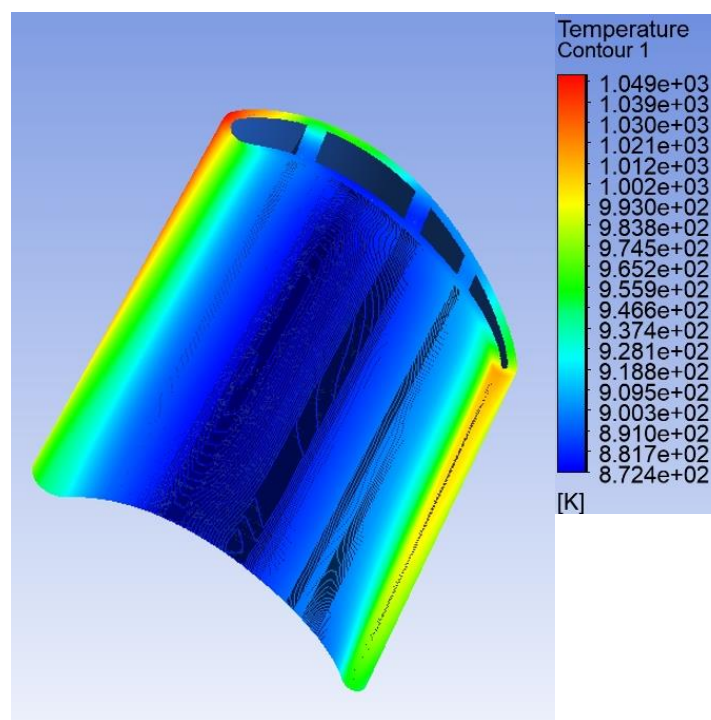


Abbildung 3.4 Temperaturverteilung in der Turbinenschaufel

In der Hochdruckturbinen sind die Turbinenschaufeln anspruchsvollen Bedingungen ausgesetzt, wie den hohen Temperaturen und den sehr hohen Drehzahlen des Rotors, welche bis zu 15000U/min erreichen können.[24] Dies führt zu hohen zentrifugal- und thermischen Spannungen. Eine Festigkeitsanalyse wurde mit ANSYS Structural Analysis durchgeführt. Die Abbildung 3.5 bzw. 3.6 zeigen die auftretenden Spannungen bzw. die Verformung, die durch die Fliehkraft und die Fluidkräfte verursacht werden, unter Berücksichtigung der Betriebstemperatur der Turbinenschaufel. Es wird in der Abbildung 3.6 deutlich, dass die Schaufel am oberen Rand stark verformt wird. Da hier die Temperatur höher ist als in anderen Stellen im Profil, kann geschlussfolgert werden, dass die thermischen Spannungen neben den hohen Kräften eine wichtige Rolle in der Deformation spielen. Deswegen könnte die Verformung reduziert werden, indem ein Werkstoff ausgewählt wird, der einen möglichst kleinen thermischen Ausdehnungskoeffizienten und eine hohe Warmfestigkeit besitzt.

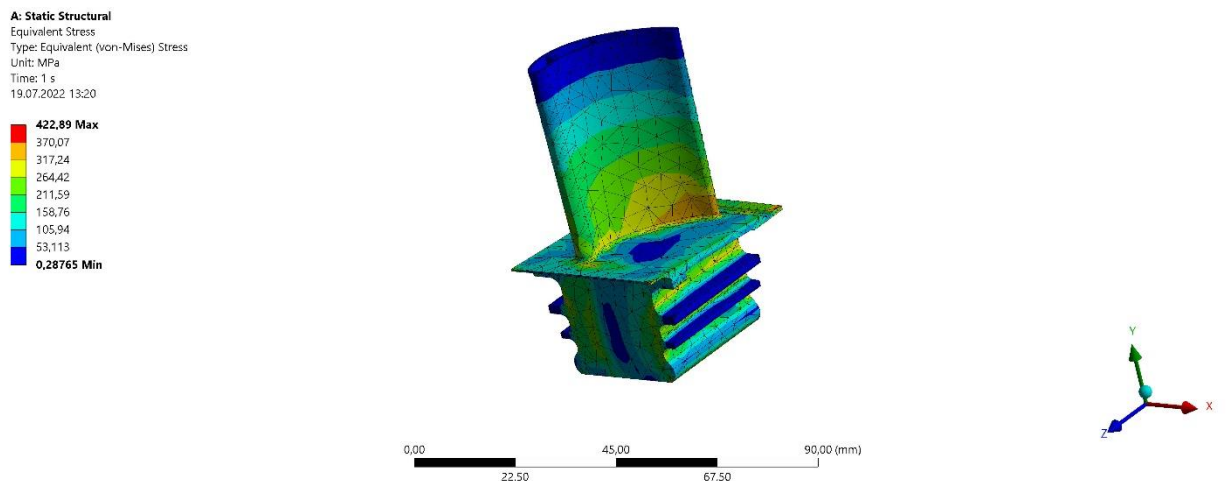


Abbildung 3.5 Vergleichsspannung (von-Mises Spannung) in der Turbinenschaufel

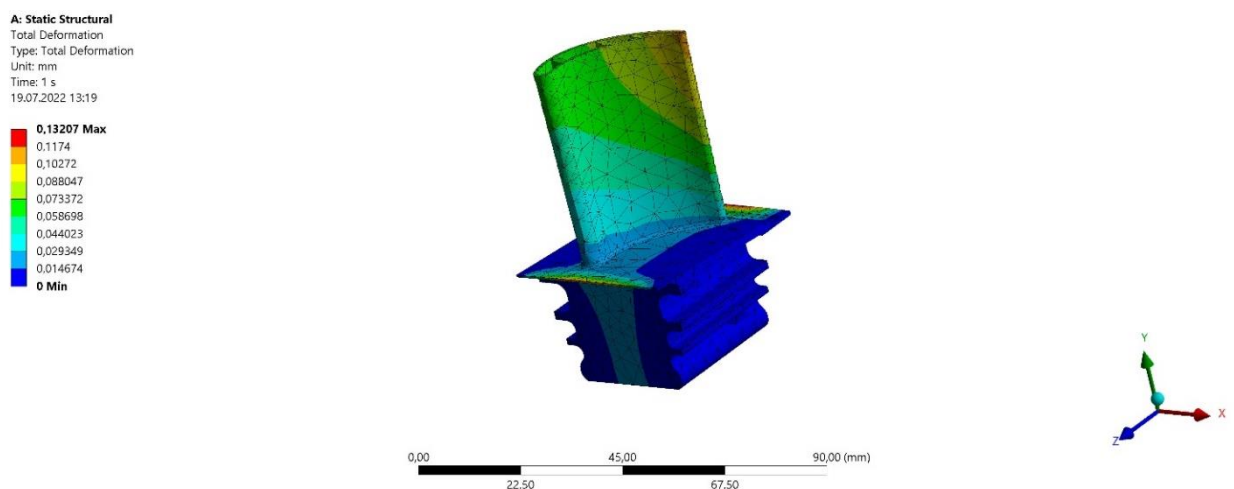


Abbildung 3.6 Verformung der Turbinenschaufel

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Ergebnisse der Werkstoffauswahl

Im nächsten Schritt der Werkstoffauswahl werden fünf Metalllegierungen, die in das Anforderungsprofil passen, näher miteinander verglichen. Der ideale Werkstoff für die Turbinenschaufeln wäre ein Werkstoff mit niedriger Dichte sowie einem niedrigen Preis. Wohingegen der Betrag des Elastizitätsmoduls, der maximalen Betriebstemperatur und der Zugfestigkeit so groß wie möglich sein soll. Im Folgenden werden die fünf ausgewählten Legierungen vorgestellt und deren Eigenschaften näher betrachtet.

Nickel-Chrom-Legierung, HAYNES 230

Neben korrosionsfesten Eigenschaften wie Zeitstandfestigkeit, Oxidationsbeständigkeit bis 1.150°C, Beständigkeit gegen Aufstickung, Aufkohlung und feuchte Bedingungen weist Haynes 230 auch einen geringeren Ausdehnungskoeffizienten und eine ausgeprägte thermische Gefüge-Stabilität gegen Kornvergrößerung auf. Im Vergleich zu anderen Knetlegierungen besitzt Haynes 230 eine exzellente Hochtemperaturfestigkeit sowie exzellente Form- und Schweißeigenschaften, welche besonders für die Additive Fertigung relevant sind. Die maximale Einsatztemperatur (T_{\max}) liegt zwischen 1090°C und 1260 °C, der Schmelzbereich zwischen 1302°C und 1371°C und die Dichte beträgt 8,968 g/cm³. [25] Der Preis auf dem Markt liegt zwischen 26,1-34 EUR/kg. Andere physikalische Eigenschaften sind z.B. die Wärmeleitfähigkeit λ mit dem Wert (bei Raumtemperatur) von 8,9 [W/mK] und Spezifische Wärme C_p von 397 [J/kgK] [26]. Haynes 230 setzt sich wie folgt zusammen:

| % | Ni | Cr | W | Mo | Co | Al | Mn | C | Si | Ph | S | B | Ti | Cu | Fe |
|-----|----|----|----|----|----|-----|-----|------|------|------|-------|-------|-----|-----|----|
| Min | 47 | 20 | 13 | 1 | - | 0,2 | 0,3 | 0,05 | 0,25 | - | - | - | - | - | - |
| Max | 65 | 24 | 15 | 3 | 5 | 0,5 | 1 | 0,15 | 0,75 | 0,03 | 0,015 | 0,015 | 0,1 | 0,5 | 3 |

Abbildung 4.1 Chemische Zusammensetzung von Haynes 230 [27]

Nickel-Chrom-Legierung, NIMONIC 81

Ninomic 81 ist eine Schmiedeeisen Nickel-Legierung. Für eine verbesserte Beständigkeit gegen hohe Temperaturkorrosion mit einer guten hohen Temperaturfestigkeit wird Nimonic 81 durch Ergänzungen von Titan und Aluminium gehärtet. Dann besitzt die Legierung einen heißen Korrosionswiderstand aufgrund seines hohen Chrom-Inhaltes, mit einem Schmelzbereich von 1305°C bis 1370°C und eine Dichte von 8,06g/cm³. [28] Der Preis liegt zwischen 16,4-18,9 EUR/kg und die maximale Einsatztemperatur (T_{\max}) zwischen 857°C und 1130 °C. [26] Andere wichtige Eigenschaften von Nimonic 81 sind Dauerfestigkeit mit dem Wert von 375MPa, E-Modul 192 GPa, Wärmeleitfähigkeit 10 W/mK und Thermische Ausdehnung 13K⁻¹. [26] NIMONIC 81 setzt sich wie folgt zusammen:

| % | Ni | C | Si | Cu | Fe | Mn | Cr | Ti | Al | Co | Mo | B | S |
|------|---------|------|-----|-----|----|-----|----|-----|-----|----|-----|-------|-------|
| Max. | Balance | 0,05 | 0,5 | 0,2 | 1 | 0,5 | 30 | 1,8 | 0,9 | 2 | 0,3 | 0,003 | 0,015 |

Abbildung 4.2 Chemische Zusammensetzung von Nimonic 81 [28]

Kobaltbasierte Superlegierung, HS 188

HS 188 ist eine Superlegierung auf Kobaltbasis. Ein Vorteil dieser Legierung ist die einfache Verarbeitung und die gute Schweißbarkeit sowohl mit manuellen als auch automatischen Methoden. HS 188 besitzt eine hervorragende Beständigkeit gegenüber hohen Temperaturen und Oxidationsbeständigkeit bis zu 1093 °C. Erwähnenswert ist auch der Schmelzbereich von 1302°C bis 1410°C und eine Dichte von 8,97 g/cm³. [29] Der Preis liegt zwischen 29,9 bis 43,8 EUR/kg auf dem Markt und die maximale Betriebstemperatur (T_{max}) liegt zwischen 1030 - 1150 °C. [26] Andere wichtige Eigenschaften von HS 188 sind Dauerfestigkeit mit dem Wert von 340 MPa, E-Modul 232GPa, Wärmeleitfähigkeit 10,6 W/mK und thermische Ausdehnung 12,6 K⁻¹. [26] Die Zusammensetzung von HS 188 sieht wie folgt aus:

| % | Ni | Cr | Co | W | La | B | C | Fe | Mn | Si | P | S |
|------|----|----|----|----|------|-------|-------|----|------|-----|------|-------|
| Min. | 20 | 20 | 37 | 13 | 0,02 | - | 0,05 | - | - | 0,2 | - | - |
| Max. | 24 | 24 | - | 16 | 0,12 | 0,015 | 0,015 | 3 | 1,25 | 0,5 | 0,02 | 0,015 |

Abbildung 4.3 Chemische Zusammensetzung von HS 188 [29]

Nickel-Chrom-Eisen Legierung, Inconel® 600:

Inconel 600 ist eine Nickel-Chrom-Eisen-Legierung mit hervorragenden mechanischen Eigenschaften und bietet eine optimale Kombination aus hoher Festigkeit und guter Bearbeitbarkeit. Der hohe Nickelgehalt verleiht der Legierung Korrosionsbeständigkeit. Der Chromgehalt bietet Beständigkeit gegen Schwefelverbindungen und oxidierende Bedingungen bei hohen Temperaturen oder korrosiven Lösungen.[30] Inconel 600 hält der Aufkohlung aufgrund ihres hohen Kohlenstoffgehalts gut stand. Bei Temperaturen von mehr als 427 Grad Celsius muss der Einsatz von bestimmten Schmiermitteln wie Molybdändisulfid vermieden werden, um eine Änderung der Materialeigenschaften zu vermeiden. [31] Der Preis reicht von 15,9 bis 18,7 EUR/kg auf dem Markt und die maximale Betriebstemperatur (T_{max}) liegt zwischen 882 - 982 °C. [26] Relevante mechanischen Eigenschaften von Inconel 600 sind unter anderem eine Zugfestigkeit bei 20°C im Intervall zwischen 490-640 N/mm², ein Elastizitätsmodul von 214 kN/mm² und Dehnung von As-35%. Bei einer Umgebungstemperatur von 20°C besitzt Inconel 600 eine Dichte von 8,5 g/cm³, eine spezifische Wärme von 460 J/kgK, eine Wärmeleitfähigkeit von 14,8 W/mK und einen elektrischen Widerstand von 0,98 Ohm mm²/m. [32] Die Zusammensetzung von Inconel 600 sieht wie folgt aus:

| % | Ni | Cr | Fe | C | Mn | Si | Co | Al | Ti | P | S | Cu | B |
|-----|------|-----|----|------|----|-----|-----|-----|-----|------|-------|-----|-------|
| Min | Rest | 144 | 6 | 0,05 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Max | Rest | 17 | 10 | 0,15 | 1 | 0,5 | 1,5 | 0,3 | 0,3 | 0,02 | 0,015 | 0,5 | 0,006 |

Abbildung 4.4 Chemische Zusammensetzung von Inconel 600 [33]

Nickel-Chrom-Superlegierung, Rene 41:

Rene 41 ist eine ausscheidungshärtende, hochwarmfeste Nickel-Chrom-Legierung mit Kobalt, Molybdän und Spuren von Aluminium und Titan. Vorteile des Werkstoffes sind die unkomplizierte Formbarkeit und ein hohes Maß an Korrosionsschutz. Außerdem besitzt der Werkstoff eine hohe Festigkeit im Temperaturbereich von 649 bis 982 Grad Celsius. Diese Legierung wurde speziell für den Einsatz in Situationen entwickelt, in denen hohe Temperaturen und extreme Belastungen auftreten. [34] Zur Erzielung der gewünschten mechanischen Eigenschaften können Kombinationen von Kaltverformung und/oder Wärmebehandlungen eingesetzt werden. [35] Der Preis liegt im Bereich von 22,0 bis 29,7 EUR/kg und die maximale Betriebstemperatur (T_{\max}) beträgt 877°C bis 1100 °C. [26] Bezüglich der mechanischen Eigenschaften hat Rene 41 eine Zugfestigkeit vom Intervall 1140 bis 1570 MPa, ein Elastizitätsmodul von 207-218 GPa und eine thermische Ausdehnung von 13 K⁻¹. Bei physikalischen Eigenschaften hat Rene 41 eine Dichte von 8150-8350 kg/m³, eine spezifische Wärme von 440-480 J/kg°C, eine Wärmeleitfähigkeit von 18-10 W/m°C und einen elektrischen Widerstand von 1,25 Ohm mm²/m. [26] RENE 41 setzt sich wie folgt zusammen:

| % | Cr | Ni | Mo | Co | Al | Ti | B | C | Fe | Mn | Si | S | Cu |
|-----|----|------------|------|----|-----|-----|-------|------|----|-----|-----|-------|-----|
| Min | 18 | - | 9 | 10 | 1,4 | 3 | 0,003 | - | - | - | - | - | - |
| Max | 20 | Verteilung | 10,5 | 12 | 1,8 | 3,3 | 0,01 | 0,12 | 5 | 0,1 | 0,5 | 0,015 | 0,5 |

Abbildung 4.5 Chemische Zusammensetzung von Rene 41 [36]

4.2 Feinauswahl

Zur Bestimmung des besten Werkstoffes für die Turbinenschaufel aus den fünf vorgestellten Kandidaten, wird die Methode „Weighted property index“ (WPI) angewendet. Dazu werden zunächst die relevanten Materialeigenschaften festgehalten und im Anschluss miteinander verglichen, um die jeweiligen Gewichtungsfaktoren zu ermitteln. Dann werden die numerischen Werte der Werkstoffeigenschaften bestimmt und normiert. Der Werkstoff mit dem höchsten Weighted Property Index hat die beste Eignung für den Anwendungsfall.

3. Sammeln der relevanten Werkstoffeigenschaften von Kandidatenwerkstoffen

| Werkstoff | Dauerfestigkeit (10 ⁷ Zyklen) [MPa] | E-Modul [GPa] | Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)] | Thermische Ausdehnung [K ⁻¹] | Dichte [kg/m ³] |
|-------------|--|------------------|---------------------------------|--|--------------------------------|
| INCONEL 600 | 220 | 207 | 14,7 | 13,1 | 8460 |
| Rene 41 | 455 | 215 | 8 | 13 | 8350 |
| HAYNES 230 | 200 | 206 | 8,54 | 13 | 9060 |
| NIMONIC 81 | 375 | 192 | 10 | 13 | 8150 |
| HS 188 | 340 | 232 | 10,6 | 12,6 | 9010 |

Die Werte aus der ANSYS Granta Bibliothek wurden konservativ ausgewählt, d.h. je nach Werkstoffeigenschaft wurde der Minimal oder Maximalwert verwendet.

4. Normierung der Werkstoffeigenschaften, Multiplikation mit Gewichtungsfaktoren, Bildung des WPI

| Werkstoffeigenschaft | Hoher Wert erforderlich | Niedriger Wert erforderlich |
|-----------------------|-------------------------|-----------------------------|
| Dauerfestigkeit | x | |
| E-Modul | x | |
| Wärmeleitfähigkeit | x | |
| Thermische Ausdehnung | | x |
| Dichte | | x |

Normierung der Werkstoffeigenschaften im Fall, wo hoher Wert erforderlich ist:

$$\frac{\text{numerische Wert der Werkstoffeigenschaft} * 100}{\text{höchster Wert}}$$

Normierung der Werkstoffeigenschaften im Fall, wo niedriger Wert erforderlich ist:

$$\frac{\text{niedriger Wert} * 100}{\text{numerische Wert der Werkstoffeigenschaft}}$$

WPI (weighted property index):

$$WPI = \sum \text{normierte Eigenschaft} * \text{Wichtungsfaktor}$$

| | Normierte Eigenschaften | | | | | |
|-------------|--|------------------|---------------------------------|--|--------------------------------|-------|
| Werkstoff | Dauerfestigkeit (10 ⁷ Zyklen) [MPa] | E-Modul [GPa] | Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)] | Thermische Ausdehnung [K ⁻¹] | Dichte [kg/m ³] | WPI |
| INCONEL 600 | 48 | 89 | 100 | 96 | 96 | 62,98 |
| Rene 41 | 100 | 93 | 54 | 97 | 98 | 92,9 |
| HAYNES 230 | 44 | 89 | 58 | 97 | 90 | 74,9 |
| NIMONIC 81 | 82 | 83 | 68 | 97 | 100 | 87,1 |
| HS 188 | 75 | 100 | 73 | 100 | 90 | 88,8 |

Wie aus der obigen Tabelle erkennbar besitzt Rene 41 den höchsten WPI und besitzt daher die beste Eignung für den untersuchten Anwendungsfall. Generell wird diese Legierung häufig in komplexen und anspruchsvollen Anwendungen eingesetzt. Aufgrund seiner hohen Festigkeit und Oxidationsbeständigkeit bei hohen Temperaturen wurden Metalllegierungen aus Nickel- Kobalt-Chrom wie Rene 41 ursprünglich für Flugzeugtriebwerke und wärmebeständige Materialien entwickelt. Wegen der Bioverträglichkeit dieser Legierung wird diese auch in medizinischen und zahnmedizinischen Anwendungen aber auch für Ringe und anderen Schmuck verwendet. [37] Es ist aber bekannt, dass diese Legierung aufgrund ihrer Anfälligkeit für Rissbildung während der Verarbeitung schwer zu bearbeiten ist und eine mäßige Schweißbarkeit aufweist. Es stimmt, dass das Vorhandensein der γ' -Phase die Legierung zu einem guten Werkstoff für Hochfestigkeits- und Hochtemperaturanwendungen macht, andererseits neigt sie auch dazu, beim Schweißen in der Wärmeeinflusszone zu reißen.[38] Dies schränkt die Verwendung dieses Werkstoffs trotz seiner außergewöhnlichen Eigenschaften ein, die den Anforderungen in Bereichen wie der Luft- und Raumfahrt entsprechen, wo die Betriebstemperaturen sehr hoch sind und die Teile unter hoher Belastung und sehr harten Bedingungen arbeiten. Ihre Komplexität erschwert jedoch ihre Herstellung. Daher wäre es von großem wirtschaftlichem und praktischem Interesse, die Verarbeitbarkeit dieser Legierung durch neue Fertigungstechniken zu verbessern. Hier ist die additive Fertigung eine aufstrebende Lösung, und wir sehen, dass viele Unternehmen beginnen, sie zu nutzen und in ihre Fertigung zu integrieren. [38]

4.3 Bearbeitung von RENE 41

Die Entwicklung der Technik zur Herstellung von Bauteilen aus Rene 41 ist weit vorangeschritten. Die Anwendung von AM-Technologien zur Herstellung von Bauteilen aus Nickelbasis-Superlegierungen wird besonders in der Luft- und Raumfahrt, Energie, Automobil und Medizin-Industrie vorangetrieben. Anwendungen dieser Materialien sind sichtbar als Turbinenschaufeln, Kernreaktoren, Turbolader, Prothetik, Wärmeaustauscher, etc. Trotz seiner außergewöhnlichen Eigenschaften ist RENE 41 aufgrund von Rissanfälligkeit während der Verarbeitung und mäßige Schweißbarkeit schwer zu bearbeiten. Aufgrund dieser Probleme gibt es Beschränkung in der Verwendung dieses Werkstoffes bei konventionellen Fertigungsverfahren. Eine der additiven Fertigungsmöglichkeiten, die für Rene 41 verfügbar ist, ist das Selektive Laserschmelzen (SLM/LPBF). Dieses additive Verfahren SLM besitzt viele Vorteile wie niedrigere Fertigungskosten und geringerer Materialverbrauch. Außerdem wird weniger Zeit als in der konventionellen Fertigung zur Bearbeitung des Bauteils benötigt. Ein anderer Vorteil, den das SLM-Verfahren bietet, ist die Konstruktive Freiheit und Funktionsintegration, weil die Turbinenschaufeln eine komplexe 3D-Geometrie sowie Hohlräume besitzen. Die hohe Härte dieses Werkstoffs hängt eng mit seiner geringen Duktilität zusammen. Die Kombination aus einem spröden Material und einem Produktionsverfahren wie SLM, das hohe Eigenspannungen induzieren kann, kann leicht zu Problemen wie Rissbildung und Ablösung des Teils von der Grundplatte führen. [39]

Zur Lösung von diesem Problem wurden verschiedene Wärmebehandlungsschemata untersucht, um die mechanische Leistung von AM-bearbeiteten Teilen zu verbessern. Die Wärmebehandlungen, die für die konventionellen Fertigungen verwendet werden, verbessern die Leistung von AM-Teilen nur bis zu einem gewissen Grad, da sich die Mikrostruktur in geschmiedeten und gegossenen Bauteilen erheblich von der Mikrostruktur von AM-Komponenten unterscheidet. Die Eigenspannungen, Poren, Risse und andere Herstellungsfehler können erkannt werden und bedingt durch nachträgliche Wärmebehandlung abgemildert oder beseitigt werden. Der Einsatz einer Vorwärmebehandlung des Werkstoffes bei der additiven Fertigung kann helfen der Rissanfälligkeit entgegenzuwirken. [40]

Selektives Laserschmelzen (SLM) (Laser Powder Bed Fusion)

Das selektive Laserschmelzen (SLM) ist ein additives Verfahren, das zur Gruppe der Strahlschmelzverfahren gehört. Bei diesem Herstellungsverfahren werden aus feinen Metallpulvern unter Einwirkung eines Laserstrahls Schicht für Schicht gewünschte Bauteile mit hochkomplexen Geometrien hergestellt. [41] Durch diesen hohen Laserenergieeintrag schmilzt das Metallpulver und verfestigt sich beim Abkühlen. Die Arbeitsschritte beginnen, wenn das gewählte Metallpulver in sehr dünner Schichtstärke auf eine bewegliche Bauplattform aufgetragen wird. Nach einem vordefinierten Muster, das mithilfe eines CAD-Programms erstellt wurde, verschmilzt ein Laserstrahl das Pulver in eine feste Struktur. Als nächstes wird die Bauplattform abgesenkt und eine neue Beschichtung aus Metallpulver aufgesprüht. Diese Schritte werden wiederholt, bis das Bauteil Schicht für Schicht erstellt

wurde. Außerdem wird das ungeschmolzene Metallpulver gesammelt und für nachfolgende SLM-Projekte verwendet. [42] Potenzielle Anwendungen für SLM-Produkte liegen vor allem in der Luft- und Raumfahrttechnik, im Automobil- und Maschinenbau und in der Medizintechnik und Prothetik.[48]

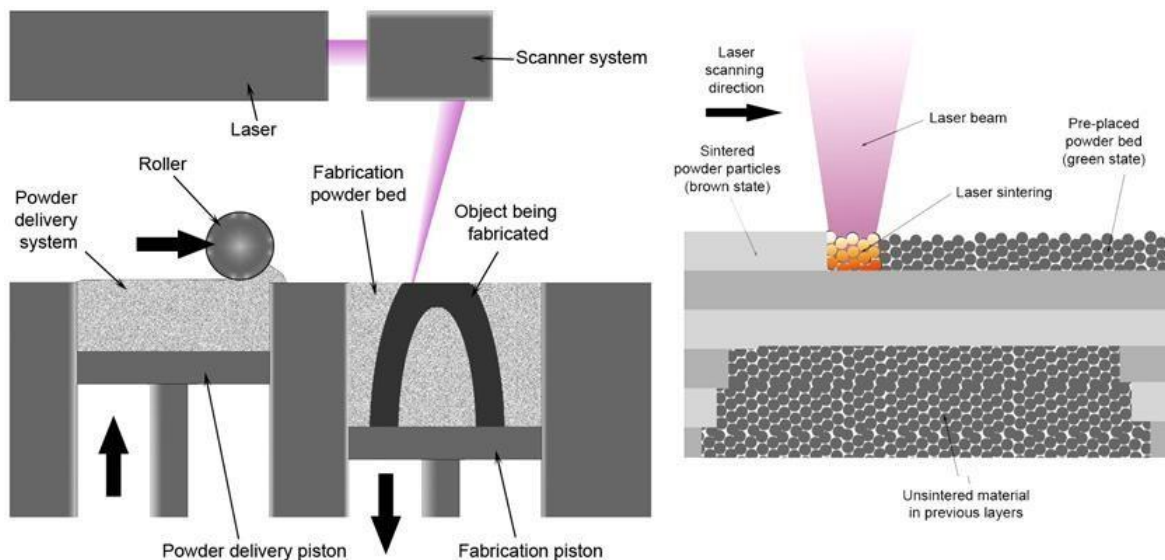


Abbildung 4.10 Schema des Fertigungsverfahrens [46]

SLM hat den Vorteil, dass keine Werkzeuge oder Formen benötigt werden, wie dies bei traditionellen Herstellungsverfahren der Fall ist. [44] Darüber hinaus kann das SLM-Verfahren bei der Herstellung von kundenspezifischen Komponenten zu massenproduktionsnahen Preisen helfen.[43] Dieses Verfahren spart außerdem Zeit und minimiert die Herstellungskosten, was die Produktion für Unternehmen lukrativ macht. Weitere Vorteile, die eine wichtige Rolle bei der Herstellung spielen, sind die Fertigung nach Bedarf, die Konstruktive Freiheit und Funktionsintegration.[47] Die hohe Konstruktionsfreiheit ermöglicht die Herstellung von Formen oder Matrizeinsätze (und anderen Werkzeugen) mit komplexen Kavitäten und Hohlräumen wie konturnahen Kühlkanälen. Diese Anwendungen erfordern jedoch ein Material mit hoher Härte und Verschleißfestigkeit. Darüber hinaus können mit dem selektiven Laserschmelzen große metallische Elemente in einem einzigen Prozess hergestellt werden. Bei den Toleranzen kann in den meisten Fällen je nach Bauteilgeometrie und gewünschtem Material von einer Abweichung von $\pm 0,1\%$ ausgegangen werden. [45]

Bei der Anwendung von SLM hat eine hohe Härte eine große Bedeutung. Bei herkömmlichen Werkstoffen kann dies durch eine Wärmebehandlung erreicht werden. Für die SLM gibt es allerdings Möglichkeiten der Vorbehandlung, die eine nachträgliche Wärmebehandlung teilweise ersetzen können. Dabei wird die Grundplatte vorgewärmt, um Temperaturgradienten auszugleichen, damit thermische Spannungen und somit die Menge an Rissbildung verringert wird.

Die hohen Temperaturen und Abkühlgeschwindigkeiten, die im SLM-Prozess erreicht werden, führen zu einer Eigenwärmebehandlung, die auf die SLM-produzierten Teile angewendet wird, was zu einer Härte und Zugfestigkeit führt, die sich denen von herkömmlichen wärmebehandelten Teilen annähern. [49] Die Verfeinerung der aktuellen Wärmebehandlungsschemata, die auf Superlegierungen von Nickelbasis speziell für AM angewendet werden, kann derzeit der praktischste Ansatz sein.

5 Zusammenfassung und Ausblick

5.1 Zusammenfassung unserer Ergebnisse

Die Bearbeitung des Projektseminars zur Werkstoffauswahl einer Turbinenschaufel hat mit der Recherche von Abmessungen, technischen Daten und den Betriebszuständen des Triebwerks IAE V2500 angefangen. Nachdem alle relevanten Werte ermittelt wurden und die Funktionsweise des Triebwerks bzw. der Schaufel untersucht wurde, wurden relevante Anforderungen an den Werkstoff festgehalten, um mittels ANSYS Granta eine systematische Vorauswahl zu treffen. Des Weiteren wurde mithilfe von ANSYS CFX eine Strömungssimulation durchgeführt und die Wärmeübertragung zwischen der Turbinenschaufel und dem Arbeitsfluid untersucht. Zusätzlich wurden mit ANSYS Static Structural die Fluidkräfte und die resultierende Deformation des Bauteils ausgerechnet. Die drei genannten Arbeitsschritte dienten dazu, die diversen Werkstoffgruppen aus der Vorauswahl anschaulich miteinander zu vergleichen und ungeeignete Werkstoffe auszuschließen. Im nächsten Schritt wurden in der Feinauswahl fünf geeignete Werkstoffe im Detail untersucht und methodisch miteinander verglichen. Mithilfe des Weighted Property Index werden unterschiedliche Materialeigenschaften verschieden gewichtet und so der am besten geeigneten Werkstoff ermittelt.

Ergebnis der Untersuchung ist, dass Rene 41 (eine Nickel-Chrom-Superlegierung mit Zugaben von Kobalt und Molybdän) hinsichtlich der geforderten Eigenschaften die beste Eignung als Werkstoff für die Turbinenschaufel hat. Neben sehr hohen Festigkeiten, einer hohen Betriebstemperatur und einer hohen Resistenz gegen Oxidation, sticht Rene 41 auch mit einer geringen thermischen Ausdehnung und einer vergleichsweise geringen Dichte hervor. Zudem ist für Rene 41 das Fertigungsverfahren des Selektiven Laserschmelzens (LPBF) verfügbar, wodurch die vielen Vorteile der Additiven Fertigung in die Produktion der Turbinenschaufel eingebunden werden.

5.2 Ausblick

Die großen Schwierigkeiten für die Fertigung von Komponenten aus der Luft- und Raumfahrtindustrie setzen sich neben komplexen Geometrien und soliden strukturellen Eigenschaften, auch aus den hohen Qualitätsanforderungen und den strengen Sicherheitsanforderungen zusammen. Der Trend zur Additiven Fertigung (AM) ergibt sich aus dem Bedarf, komplexe Bauteile effizient, kostengünstig und materialsparend herzustellen. Ferner bieten Additive Fertigungsmethoden die Möglichkeit Geometrien und Topologien herzustellen, die mit herkömmlichen Fertigungsschritten gar nicht oder nur mit sehr hohen Mehrkosten realisierbar sind. Auch in der Entwicklung und im Prototypenbau gibt es einen Mehrwert beim Einsatz von AMs, so ist die Herstellung sowohl deutlich weniger Zeitaufwändig als auch Kosteneffektiver, da beispielsweise keine neuen Formen und Werkzeug Aufsätze benötigt werden und die Materialverschwendung um bis zu 98% reduziert wird.

Es wird erwartet, dass der Markt für additive Fertigung in der Luft- und Raumfahrtindustrie mit einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate (CAGR) von 22,17 % wächst und bis zum Jahr 2026 einen Wert von 6,75 Milliarden US-Dollar erreicht. [47]

Nichtsdestotrotz gibt es für Einsatz der AM in der Luftfahrt noch Hürden zu überwinden. Es ist beispielsweise von äußerster Wichtigkeit, dass ein Bauteil in Übereinstimmung mit internationalen Normen hergestellt wird. Bei der traditionellen Fertigung ist der Prozess der Festlegung dieser Spezifikationen bereits abgeschlossen, während bei der additiven Fertigung dieser Prozess noch nicht vollständig ausgereift ist. Folglich ist es nicht so einfach zu überprüfen, ob ein Produkt in Übereinstimmung mit den Spezifikationen hergestellt wurde.

Zusammenfassend lässt sich vorhersagen, dass in der Luft- und Raumfahrtbranche die additive Fertigung aufgrund ihrer Schnelligkeit und Effektivität bei der Herstellung individueller, leichter und strukturell solider Komponenten an Beliebtheit zunehmen wird und voraussichtlich in der Zukunft ein integraler Bestandteil der Fertigung sein wird.

Literaturverzeichnis

- [1] 3dnatives: Siemens druckt Gasturbinen,
<https://www.3dnatives.com/de/siemens-druckt-gasturbinen-slm-08022017/#!>
- [2] Statista: Anzahl der weltweiten Flüge,
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/411620/umfrage/anzahl-der-weltweiten-fluege/>
- [3] de-academic: Funktionsweise eines Mantelstromtriebwerks,
<https://de-academic.com/dic.nsf/dewiki/910116>
- [4] aviation.stackexchange: Querschnitt eines Mantelstromtriebwerks,
<https://aviation.stackexchange.com/questions/11586/what-is-a-high-bypass-geared-turbofan-and-why-is-it-so-much-more-efficient>
- [5] aeroreport: High-Bypass-Triebwerke der Zukunft,
<https://aeroreport.de/de/innovation/high-bypass-triebwerke-der-zukunft>
- [6] strom-forschung: Leistung von Gasturbinen durch exakte Kühlung steigern,
<https://www.strom-forschung.de/projekte/thermische-kraftwerke/leistung-von-gasturbinen-durch-exakte-kuehlung-steigern>
- [7] researchgate: Entwicklung des Nebenstromverhältnisses im Lauf der Zeit,
https://www.researchgate.net/figure/Development-of-Turbofan-Engine-Bypass-Ratio-Ballal-and-Zelina-2003_fig4_306082636
- [8] Stewart Glegg, William Devenport, Aeroacoustics of Low Mach Number Flows, Academic Press, 2017, Seite 463-500, <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/high-bypass-ratio-turbofan-engine>
- [9] iph-hannover: fertigungsverfahren, <https://www.iph-hannover.de/de/dienstleistungen/fertigungsverfahren/uebesicht-fertigungsverfahren>
- [10] EMAG: ECM - Elektrochemische Metallbearbeitung
<https://www.emag.com/de/branchen-Loesungen/technologien/ecm/#:~:text=ECM%20%2D%20Electro%2DChemical%20Machining%20ist,anodische%20Auf%C3%B4sung%20von%20Metall%20bearbeitet>
- [11] EMAG: ECM-/PECM-Maschinen PO 100 SF
<https://www.emag.com/de/produkte-services/maschinen/ecm-pecm-maschinen/po-100-sf/>

- [12] Marius Geilich, Analyse konventionelle Antriebssysteme und Entwicklungspotenziale von Fluggasturbinen im zivilen Luftverkehr, Masterarbeit, Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt, 2019, Seite 96, https://elib.dlr.de/133299/1/2019-Geilich-Masterarbeit_DLR-IB.pdf
- [13] Studylib: V2500 Familiarization -1 - Technical Training MTU User Manual, Seite 19-21, <https://studylib.net/doc/25337254/v2500-familiarization--1---technical-tra>
- [14] Chemie: Warmfestigkeit, <https://www.chemie.de/lexikon/Warmfestigkeit.html>
- [15] Glossar Item24: Wärmeausdehnung, <https://glossar.item24.com/glossarindex/artikel/item/waermeausdehnung.html>
- [16] DLR Thermal Barrier Coatings, https://www.dlr.de/wf/en/desktopdefault.aspx/tabid-1694/2303_read-4863/
- [17] blog.softinway: Cooling Methods, <https://blog.softinway.com/cooling-methods-in-turbine-blades/>
- [18] Studyflix: Wärmeleitfähigkeit, <https://studyflix.de/ingenieurwissenschaften/waermeleitfaehigkeit-1310>
- [19] Easa Europa: Data Sheet IAE V2500 https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/IM%20E%20069%20Issue04_20191212.pdf
- [20] Chemie: Emodul, <https://www.chemie.de/lexikon/Elastizit%C3%A4tsmodul.html>
- [21] Infohas: Phases of Flight, <https://www.infohas.ma/en/phases-of-flight/>
- [22] Maschinenbau Wissen: Dauerfestigkeit, <https://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/mechanik/festigkeitslehre/122-dauerfestigkeit>
- [23] Ejot: Korrosionsratgeber, <https://www.ejot.de/korrosion-ratgeber/korrosionsarten>
- [24] Easa.europa: International Aero Engines AG (IAE), TYPE-CERTIFICATE DATA SHEET for Engine V2500-A5, V2500-D5, V2500-E5 Series, https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/IM%20E%20069%20Issue04_20191212.pdf
- [25] ZAPP: HAYNES® 230® alloy I NiCr22W14Mo Datenblatt, https://www.zapp.com/fileadmin/_documents/Downloads/materials/high_performance_alloys/de/HAYNES_230-alloy-Datenblatt.pdf
- [26] Ansys GRANTA
- [27] NeoNickel: Alloy 230, <https://www.neonickel.com/de/alloys/nickellegierungen/alloy-230/>
- [28] Alibaba: Nimonic 81, <https://german.alibaba.com/product-detail/Lambor-high-quality-nimonic-81-stainless-60839072289.html>
- [29] NeoNickel: Alloy 188, <https://www.neonickel.com/de/alloys/kobaltlegierungen/alloy-188/>

[30] HARALD PIHL: INCONEL 600

<https://www.haraldpihl.com/de/products/heat-resistant-alloys/inconel-600/>

[31] Special Metals: INCONEL (nickel-chromium-iron) alloy 600

<https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel/inconel-alloy-600.pdf>

[32] Metalcor: Inconel 600, Nicrofer 7216H

<http://www.metalcor.de/datenblatt/108/>

[33] Teamedelstahl: Datenblatt Werkstoff 2.4816 / Alloy 600

<https://www.teamedelstahl.de/werkstoffe/2-4816/>

[34] Magellan Metals: Advanced Grade Rene 41 Specialty Alloy

<https://www.magellanmetals.com/rene-41>

[35] Alloy Wire: Rene 41

<https://www.alloywire.de/products/rene-41/>

[36] NeoNickel: Rene 41

<https://www.neonickel.com/de/alloys/nickellegierungen/rene-41/>

[37] Höganäs: Implantate und Flugzeugtriebwerke aus Kobalt-Chrom-Pulvern für additive Fertigung, <https://www.hoganas.com/de/powder-technologies/additive-manufacturing-metal-powders/3d-printing-metal-powders/cobalt-chrome-alloys-3d-printing-metal-powders/>

[38] Laser Powder Bed Fusion of Precipitation Hardened Rene 41 and Rene 77 Nickel Base Superalloys , Sila Ece Atabay, Thesis, McGill University, Montreal, Quebec, Canada

[39] Graybill, Benjmain & Li, Ming & Malawey, David & Ma, Chao & Alvarado Orozco, Juan & Martinez Franco, Enrique. (2018) Additive Manufacturing of Nickel-Based Superalloys.

https://www.researchgate.net/publication/327854594_Additive_Manufacturing_of_Nickel-Based_Superalloys

[40] Bi Zhang, Yongtao Li, Qian Bai, Defect Formation Mechanisms in Selective Laser Melting: A Review <https://rdcu.be/cVJSt>

[41] 3D-Laserdruck: Selektives Laserschmelzen: 3D-Druck für Metalle

[https://www.3d-](https://www.3d-laserdruck.de/leistungen?gclid=CjwKCAjwmJeYBhAwEiwAXlg0ATkdO_zQafRjPtJFsrqZ6eJPoj9zXkggFisfMB1duKoJUoiHTS3rYRoCJzEQAvD_BwE)

[laserdruck.de/leistungen?gclid=CjwKCAjwmJeYBhAwEiwAXlg0ATkdO_zQafRjPtJFsrqZ6eJPoj9zXkggFisfMB1duKoJUoiHTS3rYRoCJzEQAvD_BwE](https://www.3d-laserdruck.de/leistungen?gclid=CjwKCAjwmJeYBhAwEiwAXlg0ATkdO_zQafRjPtJFsrqZ6eJPoj9zXkggFisfMB1duKoJUoiHTS3rYRoCJzEQAvD_BwE)

[42] FKM Laser Sintering: Selektives Laserschmelzen (SLM)

[https://www.fkm.net/technologie/selektives-](https://www.fkm.net/technologie/selektives-laserschmelzen?gclid=CjwKCAjwmJeYBhAwEiwAXlg0ASF_mAeXxCIKWjGmjNBliVZS487yyuHFmcS3Rwi8aZLOF8cjE2RoLxoC3JIQAvD_BwE)

[laserdruck.de/leistungen?gclid=CjwKCAjwmJeYBhAwEiwAXlg0ASF_mAeXxCIKWjGmjNBliVZS487yyuHFmcS3Rwi8aZLOF8cjE2RoLxoC3JIQAvD_BwE](https://www.fkm.net/technologie/selektives-laserschmelzen?gclid=CjwKCAjwmJeYBhAwEiwAXlg0ASF_mAeXxCIKWjGmjNBliVZS487yyuHFmcS3Rwi8aZLOF8cjE2RoLxoC3JIQAvD_BwE)

[43] RWTH Aachen University: Laser Powder Bed Fusion (L-PBF)

[https://www.iop.rwth-](https://www.iop.rwth-aachen.de/cms/Produktionstechnik/Forschung/Demonstratoren/~gvto/Selective-Laser-)

[aachen.de/cms/Produktionstechnik/Forschung/Demonstratoren/~gvto/Selective-Laser-](https://www.iop.rwth-aachen.de/cms/Produktionstechnik/Forschung/Demonstratoren/~gvto/Selective-Laser-)

Anhang

| | Nickel-chromium alloy, HAYNES 230, annealed | Nickel-chromium alloy, INCONEL 600, annealed | Nickel-Cr-Co-Mo alloy, Rene 41 | Cobalt-base-superalloy, HS 188, solution treated | Nickel-chromium alloy, NIMONIC 81, heat treated |
|--|--|---|-----------------------------------|---|---|
| General information | | | | | |
| Condition | Annealed | Annealed | | Solution treated | Heat treated |
| UNS number | N06230 | N06600 | N07041 | R30188 | |
| US name | ASTM Grade N06230; AMS 5878, 5891, 5839 | ASTM Grade N06600; AMS 5540, 5580, 5665, 5687, 7232 | AMS 5399, 5545, 5712, 5713 | AMS 5801 | |
| EN name | | NiCr15Fe | NiCr19Co11 | | |
| EN number | | 2.4816 | | 2.4683 | |
| ISO name | | ISO 9723, 9724, 9725, 6208, 6207, 4955A | | | |
| Included in Materials Data for Simulation | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | |
| Composition overview | | | | | |
| Material family | Metal (non-ferrous) | Metal (non-ferrous) | Metal (non-ferrous) | Metal (non-ferrous) | Metal (non-ferrous) |
| Base material | Ni (Nickel) | Ni (Nickel) | Ni (Nickel) | Co (Cobalt) | Ni (Nickel) |
| Composition detail (metals, ceramics and glasses) | | | | | |
| Al (aluminum) (%) | 0,2 - 0,5 | 0 | 1,4 - 1,8 | 0 | 1 |
| B (boron) (%) | 0 - 0,015 | 0 | 0,003 - 0,01 | 0 | 0 |
| C (carbon) (%) | 0,05 - 0,15 | 0 - 0,15 | 0 - 0,12 | 0,05 - 0,15 | 0 |
| Co (cobalt) (%) | 0 - 5 | 0 | 10 - 12 | 39 | 0 |
| Cr (chromium) (%) | 20 - 24 | 14 - 17 | 18 - 20 | 20 - 24 | 30 |
| Cu (copper) (%) | 0 | 0 - 0,5 | 0 | 0 | 0 |
| Fe (iron) (%) | 0 - 3 | 6 - 10 | 0 - 5 | 0 - 3 | 0 |
| La (lanthanum) (%) | 0,005 - 0,05 | 0 | 0 | 0,02 - 0,12 | 0 |
| Mn (manganese) (%) | 0,3 - 1 | 0 - 1 | 0 - 0,1 | 0 - 1,25 | 0,3 |
| Mo (molybdenum) (%) | 1 - 3 | 0 | 9 - 10,5 | 0 | 0 |
| Ni (nickel) (%) | 47,5 - 65,2 | 72 - 79 | 46,7 - 58,6 | 22 | 66 - 67 |
| P (phosphorus) (%) | 0 - 0,03 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S (sulfur) (%) | 0 - 0,015 | 0 - 0,015 | 0 - 0,015 | 0 | 0 |
| Si (silicon) (%) | 0,25 - 0,75 | 0 - 0,5 | 0 - 0,5 | 0,2 - 0,5 | 0,3 |
| Ti (titanium) (%) | 0 | 0 | 3 - 3,3 | 0 | 1,8 |
| W (tungsten) (%) | 13 - 15 | 0 | 0 | 13 - 16 | 0 |
| Other (%) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 - 0,1 |
| Price | | | | | |
| Price (EUR/kg) | 26,1 - 34 | 15,9 - 18,7 | 22 - 29,7 | 29,9 - 43,8 | 16,4 - 18,9 |
| Price per unit volume (EUR/m ³) | 232000 - 308000 | 133000 - 158000 | 179000 - 248000 | 267000 - 396000 | 130000 - 154000 |
| Physical properties | | | | | |
| Density (kg/m ³) | 8880 - 9060 | 8370 - 8460 | 8150 - 8350 | 8920 - 9010 | 7950 - 8150 |
| Mechanical properties | | | | | |
| Young's modulus (GPa) | 206 - 216 | 207 - 218 | 215 - 225 | 232 - 244 | 192 - 200 |
| Young's modulus with temperature (GPa) # | 198 | 214 | 214 | 231 | |
| Specific stiffness (MN.m/kg) | 22,9 - 24,2 | 24,6 - 25,9 | 26 - 27,4 | 25,9 - 27,2 | 23,8 - 24,9 |
| Yield strength (elastic limit) (MPa) | 384 - 413 | 221 - 262 | 910 - 1170 | 379 - 419 | 540 - 660 |
| Yield strength with temperature (MPa) # | 367 | 246 | 941 | 376 - 415 | |
| Tensile strength (MPa) | 825 - 885 | 517 - 586 | 1140 - 1570 | 862 - 953 | 940 - 1160 |
| Tensile strength with temperature (MPa) # | 758 | 552 | | 863 - 954 | |
| Specific strength (kN.m/kg) | 42,7 - 46,1 | 26,3 - 31,1 | 110 - 142 | 42,3 - 46,7 | 67 - 82 |

| | Nickel-chromium alloy, HAYNES 230, annealed | Nickel-chromium alloy, INCONEL 600, annealed | Nickel-Cr-Co-Mo alloy, Rene 41 | Cobalt-base-superalloy, HS 188, solution treated | Nickel-chromium alloy, NIMONIC 81, heat treated |
|--|--|---|-----------------------------------|---|---|
| Elongation (% strain) | 42,9 - 52,9 | 25 - 35 | 10 - 20 | 40 - 46,5 | 28 - 44 |
| Tangent modulus (MPa) | 1930 | 1580 | 3020 | 2240 | |
| Compressive strength (MPa) | 384 - 413 | 241 - 462 | 910 - 1170 | 379 - 724 | 540 - 660 |
| Flexural modulus (GPa) | 206 - 216 | 207 - 218 | 215 - 225 | 232 - 244 | 192 - 200 |
| Flexural strength (modulus of rupture) (MPa) | 383 - 413 | 221 - 262 | 910 - 1170 | 379 - 419 | 540 - 660 |
| Shear modulus (GPa) | 77 - 81 | 76 - 79,9 | 80 - 90 | 88 - 92,5 | 70 - 80 |
| Bulk modulus (GPa) | 194 - 221 | 164 - 173 | 160 - 190 | 203 - 214 | 135 - 160 |
| Poisson's ratio | 0,323 - 0,337 | 0,29 - 0,302 | 0,28 - 0,3 | 0,31 - 0,323 | 0,27 - 0,29 |
| Shape factor | 27 | 29 | 17 | 28 | 23 |
| Hardness - Vickers (HV) | 200 - 240 | 135 - 170 | 400 - 500 | 230 - 320 | 280 - 400 |
| Hardness - Rockwell B (HRB) | 37 - 49 | 74 - 85 | 112 - 117 | | 103 - 112 |
| Hardness - Rockwell C (HRC) | 0 | 0 - 4 | 41 - 49 | | 27 - 41 |
| Hardness - Brinell (HB) | 180 - 220 | 135 - 164 | 379 - 471 | 219 - 304 | 265 - 379 |
| Elastic stored energy (springs) (kJ/m ³) | 348 - 405 | 116 - 161 | 1910 - 3070 | 302 - 369 | 750 - 1100 |
| Fatigue strength at 10 ⁷ cycles (MPa) | 200 - 500 | 220 - 365 | 455 - 785 | 340 - 530 | 375 - 580 |
| Fatigue strength model (stress amplitude) (MPa) # | 199 - 502 | 215 - 374 | 406 - 880 | 334 - 540 | 348 - 625 |
| Impact & fracture properties | | | | | |
| Fracture toughness (MPa.m ^{0.5}) | 277 - 307 | 349 - 386 | 86,6 - 96,2 | 120 - 150 | 205 - 228 |
| Toughness (G) (kJ/m ²) | 363 - 448 | 575 - 703 | 34,1 - 42,1 | 61,2 - 93,6 | 216 - 266 |
| Thermal properties | | | | | |
| Melting point (°C) | 1290 - 1380 | 1360 - 1420 | 1320 - 1370 | 1300 - 1330 | 1280 - 1400 |
| Maximum service temperature (°C) | 1090 - 1260 | 882 - 982 | 877 - 1100 | 1030 - 1150 | 857 - 1130 |
| Minimum service temperature (°C) | -273 | -273 | -273 | -273 | -273 |
| Thermal conductivity (W/m.°C) | 8,54 - 9,26 | 14,7 - 15,9 | 8 - 10 | 10,6 - 11,5 | 10 - 11,5 |
| Thermal conductivity with temperature (W/m.°C) # | 9,04 | 13,8 | 9,3 | 10,6 | |
| Specific heat capacity (J/kg.°C) | 381 - 430 | 461 - 480 | 440 - 480 | 419 - 436 | 440 - 480 |
| Specific heat capacity with temperature (J/kg.°C) # | 400 | 435 | 452 | 405 | |
| Thermal expansion coefficient (µstrain/°C) | 12,4 - 13 | 12,4 - 13,1 | 11 - 13 | 12 - 12,6 | 10 - 13 |
| Thermal expansion coefficient with temperature (µstrain/°C) # | 13,1 | 12,5 | 10,8 | 11,3 | |
| Thermal expansion coefficient with temperature_Reference temp (°C) | 20 | 20 | 20 | 20 | |
| Thermal shock resistance (°C) | 141 - 156 | 81,2 - 97,6 | 338 - 456 | 128 - 145 | 227 - 314 |
| Thermal distortion resistance (MW/m) | 0,669 - 0,734 | 1,15 - 1,26 | 0,652 - 0,858 | 0,858 - 0,942 | 0,812 - 1,09 |
| Latent heat of fusion (kJ/kg) | 285 - 300 | 285 - 300 | 275 - 300 | 255 - 270 | 275 - 300 |
| Electrical properties | | | | | |
| Electrical resistivity (µhm.cm) | 123 - 127 | 98 - 108 | 125 - 136 | 90 - 95 | 120 - 135 |
| Electrical conductivity (%IACS) | 1,35 - 1,41 | 1,6 - 1,76 | 1,27 - 1,38 | 1,81 - 1,92 | 1,28 - 1,44 |
| Electrical conductivity with temperature (Siemens/m) # | | | 788000 | | |
| Galvanic potential (V) | -0,16 - -0,08 | -0,11 - -0,03 | -0,04 - 0,04 | -0,22 - -0,14 | -0,14 - -0,06 |
| Magnetic properties | | | | | |
| Magnetic type | Non-magnetic | Non-magnetic | Non-magnetic | Non-magnetic | Non-magnetic |
| Optical, aesthetic and acoustic properties | | | | | |
| Transparency | Opaque | Opaque | Opaque | Opaque | Opaque |
| Acoustic velocity (m/s) | 4780 - 4920 | 4960 - 5090 | 5100 - 5230 | 5080 - 5220 | 4880 - 4990 |
| Mechanical loss coefficient (tan delta) | 0,0001 - 0,001 | 0,0005 - 0,0013 | 0,0001 - 0,0003 | 0,0003 - 0,0005 | 0,0003 - 0,0005 |
| Restricted substances risk indicators | | | | | |
| SIN List indicator (0-1, 1 = high risk) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| | Nickel-chromium alloy, HAYNES 230, annealed | Nickel-chromium alloy, INCONEL 600, annealed | Nickel-Cr-Co-Mo alloy, Rene 41 | Cobalt-base-superalloy, HS 188, solution treated | Nickel-chromium alloy, NIMONIC 81, heat treated |
|--|--|--|--|---|--|
| ^ Critical materials risk | | | | | |
| Contains >5wt% critical elements? | Yes | Yes | Yes | Yes | Yes |
| ^ Processing properties | | | | | |
| Metal casting | Unsuitable | Unsuitable | Unsuitable | Unsuitable | Unsuitable |
| Metal cold forming | Acceptable | Acceptable | Acceptable | Excellent | Acceptable |
| Metal hot forming | Acceptable | Limited use | Acceptable | Excellent | Acceptable |
| Metal press forming | Acceptable | Acceptable | Acceptable | Acceptable | Acceptable |
| Metal deep drawing | Limited use | Limited use | Limited use | Limited use | Limited use |
| Machining speed (m/min) | 3,66 | 8,84 | 3,05 | 13,1 | 3,66 |
| Weldability | Good | Good | Good | Good | Good |
| Weldability_Notes | Preheating is not required, post weld heat treatment is required | Preheating is not required, post weld heat treatment is required | Preheating is not required, post weld heat treatment is required | Preheating and post weld heat treatments are not required | Preheating is not required, post weld heat treatment is required |
| Weldability - MIG | | Good | | | |
| Weldability - plasma | | Good | | | |
| Weldability - SAW | | Good | | | |
| Weldability - TIG | | Good | | | |
| Brazeability | | Good | | | |
| ^ Durability | | | | | |
| Water (fresh) | Excellent | Excellent | Excellent | Excellent | Excellent |
| Water (salt) | Excellent | Excellent | Excellent | Excellent | Excellent |
| Weak acids | Excellent | Excellent | Excellent | Excellent | Excellent |
| Strong acids | Acceptable | Acceptable | Acceptable | Acceptable | Acceptable |
| Weak alkalis | Excellent | Excellent | Excellent | Excellent | Excellent |
| Strong alkalis | Excellent | Excellent | Excellent | Excellent | Excellent |
| Organic solvents | Excellent | Excellent | Excellent | Excellent | Excellent |
| Oxidation at 500C | Excellent | Excellent | Excellent | Excellent | Excellent |
| UV radiation (sunlight) | Excellent | Excellent | Excellent | Excellent | Excellent |
| Galling resistance (adhesive wear) | Acceptable | Limited use | Acceptable | Excellent | Acceptable |
| Flammability | Non-flammable | Non-flammable | Non-flammable | Non-flammable | Non-flammable |
| ^ Corrosion resistance of metals | | | | | |
| Stress corrosion cracking | Not susceptible | Not susceptible | Not susceptible | Slightly susceptible | Not susceptible |
| Stress corrosion cracking_Notes | Rated in chloride; Other susceptible environments: Hydroxide | Rated in chloride; Other susceptible environments: Hydroxide | Rated in chloride; Other susceptible environments: Hydroxide | Rated in chloride; May be susceptible in halide, ammonia, nitrogen, acidic, caustic, carbonate environments | Rated in chloride; Other susceptible environments: Hydroxide |
| Intergranular (weld line) corrosion resistance | | Excellent | | | |
| Inorganic acids | | Moderate | | | |
| Organic acids | | Moderate | | | |
| Alkalis | | Excellent | | | |
| Humidity / water | | Excellent | | | |
| Sea water | | Excellent | | | |
| Sour oil and gas | | Excellent | | | |