

Kurzzusammenfassung

Technische Titanaluminide auf der Basis von γ -TiAl bieten — bei etwa halbem Gewicht — zu herkömmlichen Hochtemperaturwerkstoffen vergleichbare mechanische Eigenschaften, auch bei hohen Temperaturen. Ihr Einsatz als Strukturwerkstoff für z.B. Flugzeugturbinenschaufeln könnte zu erheblichen Effizienzsteigerungen führen, ist jedoch durch ein ungünstiges Oxidationsverhalten auf etwa 650 °C beschränkt. Dann führt die Konkurrenz der beiden möglichen Oxide TiO_2 und Al_2O_3 zu einem nicht-schützenden und schnellwachsendem Mischoxid, bestehend aus einem Stapel alternierender Schichten der Oxide.

Zur Änderung dieses Verhaltens wird in der vorliegenden Arbeit der Halogeneffekt eingesetzt, bei dem eine wohldefinierte Menge Fluor oberflächennah deponiert wird. Bei hohen Temperaturen ($T \geq 800$ °C) erfolgt eine selektive Bildung von Aluminiumfluoriden, die zur Oberfläche wandern und dort wegen des steigenden Sauerstoffpartialdrucks zerfallen. Das frei werdende Al oxidiert zu Al_2O_3 und bildet eine dichte und langsam wachsende Schicht. Als besonders reproduzierbare Fluorierungstechnik wird die Beamline-Ionenimplantation verwendet, bei der Tiefe und Dosis des eingebrachten Fluors genau festgelegt werden können. Da sich diese Methode nicht für die Behandlung komplexer Oberflächengeometrien eignet, werden einige auf chemischen Diffusionsprozessen beruhende alternative Fluor-Applikationsmethoden angewendet, die für eine zukünftige industrielle Anwendung bedeutungsvoll sein könnten. Fluor-Tiefenprofile werden zerstörungsfrei mittels Protonen-induzierter Gammaskopie (PIGE) gemessen, was die Möglichkeit der wiederholten Messung, nach mehreren Oxidationschritten, eröffnet. Die auf diese Weise erhaltenen Tiefenprofile bilden einen Indikator für den erfolgreichen Effekt, wie aus parallel durchgeführten Charakterisierungen der Oxidschichten mittels Rutherford-Rückstreuungsspektroskopie (RBS) deutlich wird. Um den Weg in die industrielle Anwendung weiter zu ebnen, wird ferner eine Analysenkammer für reale Bauteile aufgebaut und erste Testmessungen an einer Turbinenschaufel durchgeführt.

Abstract

Technical titanium aluminides on the basis of γ -TiAl have — by about the half weight — mechanical properties comparable to those of commonly used high-temperature materials. Their application as structural engineering material, e.g. for turbine blades in aerospace engines, could significantly enhance efficiency. Unfortunately, the maximum operating temperature is limited to about 650 °C due to their poor oxidation behaviour. Then, the competition of the two possible oxides TiO_2 and Al_2O_3 leads to a non-protective and fast growing mixed oxide scale of multiple stacks of alternating layers.

In this work, the behaviour is changed by the halogen effect for which a well-defined amount of fluorine is deponated close to the metal surface. At high temperatures ($T \geq 800$ °C) this leads to the formation of gaseous Al-fluorides which migrate to the surface and reach regions of higher oxygen partial pressure. There they decay and the aluminum is oxidated to Al_2O_3 and a dense and slowly growing Al_2O_3 scale is formed. Beamline ion implantation is used as a reproducible fluorination technique. It enables the choose of definite depth and dose of implanted fluorine but is not usable for treating surfaces with complex geometry. Therefor, several alternative fluorination techniques based on chemical diffusion processes will be examined, which may be relevant for future industrial application. Fluorine depth-profiles will be measured non-destructive using the proton induced gamma-ray emission (PIGE) technique. By this, repeated measurements after proceeded oxidation steps are possible. The F-profiles and the recognized losses of fluorine constitute an indicator for a succesful effect, as is evidenced by parallel RBS analyses. For the further way to industrial application, an analysis chamber for real components is constructed and first measurements on a turbine blade will be performed.

Kapitel 1

Einleitung, Motivation und Zielstellung

Drei starke Motivationen treiben diese Arbeit an: Material, Methode und Analytik.

Die Besonderheit des **Materials**, den Legierungen auf Basis der intermetallischen γ -Phase der Titanaluminide, liegt in ihrer niedrigen Dichte von ungefähr $3,8 \text{ g/cm}^3$. Überkommt man den allseits bekannten Nachteil einer völlig unzureichenden Oxidationsbeständigkeit bei Temperaturen über etwa $650 \text{ }^\circ\text{C}$, könnten hiermit die derzeit für Hochtemperaturanwendungen optimierten und etablierten, aber rund doppelt so schweren, Superlegierungen auf Nickelbasis ersetzt werden. Das dabei auf grob die Hälfte reduzierte Bauteilgewicht würde zu erheblichen Effizienzsteigerungen führen. Die spezifischen Werte für Festigkeit und Elastizitätsmodul der Nickelbasis-Superlegierungen bei hohen Temperaturen werden von den γ -Titanaluminiden erreicht oder übertroffen. Neben dem Hochtemperaturoxidationsverhalten waren und sind bei der Einführung der Titanaluminide zudem Herstellung und Formgebung problematisch und anspruchsvoll, werden aber zwischenzeitlich beherrscht. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich ausschließlich mit der Verbesserung des Oxidationsverhaltens bei hohen Temperaturen.

Hochtemperaturanwendungen sind z.B. die Turbinenschaufeln in Flugzeug- und stationären Gasturbinen. Auch der Turboladerrotor im automobilen Motor zählt dazu. An den Oberflächen solcher Bauteile herrschen Temperaturen von $800 \text{ }^\circ\text{C}$ und mehr. Der Wunsch nach höheren Wirkungsgraden führte bei diesen Anwendungen zu immer höheren Arbeitstemperaturen (Carnot-Wirkungsgrad). Über Jahrzehnte wurde durch optimiertes Legierungsdesign und Gefügeeinstellungen die maximale Einsatztemperatur der derzeit verwendeten Superlegierungen auf Nickelbasis erheblich gesteigert. Mittlerweile ist jedoch eine Applikation von Wärmedämmschichten und teilweise eine innere Kühlung notwendig, um die Temperatur an der Metalloberfläche zu reduzieren, da die Materialeigenschaften nahe des Schmelzpunktes (derzeit $1100 \text{ }^\circ\text{C} \approx 0,8 \cdot T_S$) ausgereizt sind. Eine weitere Effizienzsteigerung allein durch Prozessstemperaturerhöhung scheint mit diesem Material nicht mehr möglich.

Die Erkenntnis von Klimaeffekt und Schädlichkeit des CO_2 durch Industrie und Politik und die damit verbundene Notwendigkeit zur Effizienzsteigerung – unter der Voraussetzung, dass diese der Treibstoffeinsparung dient und nicht zur Leistungssteigerung „mißbraucht“ wird – könnte zu einem neuen Schub der Bemühungen führen: Wenn sowieso zusätzliche Maßnahmen nötig sind, warum nicht direkt die γ -Titanaluminide vor Hochtemperaturoxidation schützen, um so von deren niedrigerem Gewicht profitieren zu können?

Durch Legierungsdesign konnte das Oxidationsverhalten von Legierungen auf TiAl-Basis bei hohen Temperaturen, das maßgeblich von der Konkurrenz der zwei möglichen Oxide TiO_2 und Al_2O_3 geprägt ist, zwar verbessert, aber nicht grundsätzlich geändert werden. Ebenso

erwiesen sich bisherige Ansätze mittels Beschichtungen als nicht dauerhaft wirksam und zu kostenintensiv.

Vor diesem Hintergrund soll in der vorliegenden Arbeit eine andersartige und innovative Methode eingesetzt werden: Der Anfang der 1990er Jahre entdeckte Halogeneffekt beruht auf einer Verschiebung des Gleichgewichts zwischen den beiden Oxiden zugunsten einer Al_2O_3 -Bildung. Dies ist mit einer wohldosierten und -lokalisierten Zugabe von Halogenen, insbesondere Fluor, möglich. Für binäres TiAl ist bekannt, dass dieser Mikrolegierungseffekt zur Ausbildung einer dünnen und als Diffusionsbarriere wirksamen Al_2O_3 -Schicht an der Oberfläche führt und so die Hochtemperaturoxidationsfestigkeit um Größenordnungen verbessern kann. Die Stabilität der gebildeten Al_2O_3 -Schicht erwies sich in Versuchen bereits als hinreichend langzeitstabil.

Als **Methode der Materialmodifikation** soll hauptsächlich die Beamline-Ionenimplantation verwendet werden. Die auf diese Weise implantierten Fluorionen bilden eine Tiefenverteilung, die nur von wenigen und einfach zu erfassenden Parametern beeinflusst wird. Die Technik erreicht daher eine herausragende Reproduzierbarkeit und eignet sich somit insbesondere für grundlegende Untersuchungen. Der Implantier des Instituts für Kernphysik ist wegen seiner Auslegung für Beschleunigungsspannungen bis 60 kV für die Modifikation oberflächennaher Bereiche in vielen Materialien bestens geeignet. Die Stärke seines Ablenkmagneten erlaubt dabei nicht nur die Implantation leichter Ionen, wie sie in vielen anderen Anlagen möglich ist, sondern auch die Separation eher schwerer Ionen wie Y und Hf. Da die theoretischen Grundlagen der Abbremsmechanismen energetischer Ionen in Materie gut bekannt sind, ist eine Vorhersage der erreichbaren Tiefenprofile mittels Computersimulationen (Monte Carlo-Simulationen) möglich. Auf diese Weise sollen die Auswirkungen der Implantationsparameter, aber auch der Materialparameter wie Dichte und Zulegerungen, zunächst durch Simulationen untersucht werden, um die so erhaltenen Tiefenprofile mit den Ergebnissen der Analytik zu vergleichen.

Ein besonderer Stellenwert wird daher der zerstörungsfreien **Ionenstrahlanalytik** eingeräumt werden. Hier sollen die am 2,0 MV van-de-Graaff Beschleuniger des IKF vorhandenen Möglichkeiten voll ausgeschöpft und die dort etablierten zerstörungsfreien Verfahren der Protonen induzierten Gammaskopimetrie (PIGE) und der Rutherford-Rückstreuungsspektrometrie (RBS) eingesetzt werden. Mit ihrer Hilfe wird es möglich sein, sowohl die Zusammensetzung der Oxidschicht als auch die Fluor-Tiefenprofile bis zu einer Tiefe von einigen wenigen Mikrometern zu bestimmen.

Inwiefern das mittels PIGE erhaltene Fluor-Tiefenprofil auf einen erfolgreichen Effekt hindeutet, wird durch bei den Projektpartnern durchgeführte Hochtemperaturlagerungen und parallele Charakterisierungen der Oxidschicht untersucht. Die Oxidationen werden quasi-isotherm bei 900 °C durchgeführt. Die Zerstörungsfreiheit der Ionenstrahlanalytik ermöglicht dabei die wiederholte Analyse der selben Probe nach mehreren Oxidationsschritten und somit die Betrachtung der Fluor-Tiefenprofile und des Oxidschichtaufbaus als Funktion der Auslagerungszeit. Problematiken insbesondere von Kurzzeitoxidation und Fluor-Verlusten können so erschlossen werden. Um die Genauigkeit der Tiefenskala der F-Profile einschätzen und verbessern zu können, soll erstmals die tiefenabhängige Oxidzusammensetzung mit RBS ermittelt werden und in die Bestimmung der Tiefenskala der Fluorverteilung einer nahezu identischen Messstelle einfließen.

Die im Rahmen dieser Dissertation bearbeiteten Forschungsprojekte stehen in der Folge einer mehrjährigen gelungenen Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Kernphysik der Goethe-Universität IKF und dem DECHEMA-Forschungsinstitut DFI, ehemals Karl-Winnacker-Institut. Deren Arbeitsgruppe Hochtemperaturoxidation besitzt lange Erfahrung und genießt einen ausgezeichneten Ruf in der Hochtemperatur-Materialforschung. Sie wird eng

in die Auswahl der durchgeführten Analysen und Experimente eingeflochten werden. Das DFI erfüllt dabei auch die Aufgaben der Materialbeschaffung und der Probenpräparation. Weiter werden dort die Hochtemperaturlagerungen mit thermogravimetrischer Analyse und einige ergänzende zerstörende Analyseverfahren durchgeführt (mikrographische Querschliffe, REM, EDX, EPMA).

Da sich die Beamline-Ionenimplantation nicht für die Behandlung größerer oder solcher Bauteile mit komplexen Oberflächen eignet, wurden für diesen Zweck am DFI bereits einige auf chemischen Prozessen beruhende alternative Fluorierungsverfahren entwickelt. Die zerstörungsfreie Bestimmung der Fluor-Profile nach der chemischen Behandlung ist für die gezielte Entwicklung eines optimierten Parametersatzes ein unerlässliches Werkzeug. Zunächst an Standard-Laborproben sollen die verschiedenen Fluorierungsverfahren gegenübergestellt werden.

Für die Analyse größerer (industrieller) Bauteile soll eine geeignete Analysenkammer an einem neuen Kanal des 2,0 MV van-de-Graaff des Instituts geplant und aufgebaut werden. Dadurch wird der Grundstein für eine spätere Qualitätssicherung behandelter Bauteile gelegt, wie sie im industriellen Umfeld üblich und für eine Anwendung unerlässlich ist.

Die Zielsetzung erstreckt sich auf alle Motivationsbereiche:

- Material und Methode: Ist der Halogeneffekt wirksam auch für technische TiAl-Legierungen mit Zulegierungen? Wieviel Aluminium muss enthalten sein?
- Methode der Modifikation: Welche Auswirkungen haben die Implantationsparameter auf die erreichte Tiefenverteilung? Wie gut ist die Übereinstimmung zwischen Monte-Carlo Simulation und Analyse? Evaluierung alternativer Fluorierungsverfahren mit dem Ziel, industrielle Bauteile behandeln zu können.
- Analyse: Leistungsfähigkeit der Analytik, Fragen des Detektionslimits, der Präzision und der Richtigkeit der Messergebnisse. Anwendungsmöglichkeiten der RBS-Methode ausloten. Aufbau einer Vakuumkammer für die Ionenstrahlanalyse an industriellen Bauteilen.

Die ersten beiden Kapitel dieser Arbeit sind größtenteils das Ergebnis von Literaturrecherchen und beschreiben Eigenschaften des Materials TiAl sowie Grundlagen der verwendeten analytischen Methoden. Nach einer detaillierten Darstellung von PIGE-Tiefenprofilierung und Beamline-Ionenimplantation folgt in Kapitel 6 die Dokumentation der durchgeführten Experimente, die in Kapitel 7 mit der Beschreibung der installierten Analysenkammer endet. Da diese Dissertation im Rahmen von öffentlich geförderten Forschungsprojekten angefertigt wurde, sind ein Teil der präsentierten Ergebnisse bereits wissenschaftlich veröffentlicht. Ein entsprechender Literaturverweis wird dazu gegeben.

Kapitel 2

Titanaluminide

Die Elemente Titan und Aluminium wurden um die 19. Jahrhundertwende entdeckt und gehören damit zu den spät entdeckten Metallen. Aluminium wurde 1808 von SIR HUMPHRY DAVY und Titan 1791 von W. GREGOR, beide in England, sowie 1795 vom Berliner Chemiker M.H. KLAPROTH [84] entdeckt. Aluminium wurde als Aluminiumchlorid und Titan in der Form des Titaneisens bzw. als Titanoxid gefunden. Während die Herstellung reinen Aluminiums bereits 1825 von HANS CHRISTIAN ØRSTED durchgeführt wurde, gelang die Isolierung Titans im Labormaßstab erst 1910 (M.A. HUNTER). Die Entwicklung erster Legierungen auf Ti-Basis setzte schließlich in den 1940er Jahren in den USA ein, nachdem mit dem zuvor entwickelten Kroll-Verfahren [89] große Mengen Titanschwamm produziert werden konnten [142, 39]. Eine der ersten Entwicklungen war die Legierung TiAl6V4 mit 10,2 At.-% Al und Zulegierung von Vanadium, die auch heute noch zu über 50 % die eingesetzten TiAl-Legierungen dominiert [103]. Seitdem haben TiAl-Werkstoffe Einzug in viele hochpreisige Anwendungsbereiche erhalten: als Leichtbauwerkstoff in der Luft- und Raumfahrt [135], für medizinische Implantate, für Sportgeräte, Haushaltsmesser, Schmuck usw. [134]. Herausragende Eigenschaften sind, bei geringem Gewicht, die hohe Festigkeit, die Bioverträglichkeit und das Korrosions- bzw. Oxidationsverhalten.

In den 1980er Jahren ist die intermetallische γ -Phase der Titanaluminide verstärkt in den Fokus der Hochtemperaturanwendungen gerückt [99]. Anwendungen sind z.B. die Turbinenschaufeln von Flugzeug- und Kraftwerksturbinen und Turboladerrotoren im Automobilbau. Legierungen auf Basis von γ -TiAl könnten die dort derzeit eingesetzten und rund doppelt so schweren Ni-Superlegierungen ersetzen. So trägt der „Dreamliner“ Boeing 787 und die neue 747-8 (Jungferflug am 14.2.2011) im Niederdruckbereich der *GENx*-Turbine (General Electric Aviation) Schaufeln aus der γ -TiAl-Legierung GE 48-2-2 (48 At.-% Al, Nb, Cr) [60, 189]. Der Airbus *A320 neo* folgte mit TiAl-Schaufeln aus einer TNM-Legierung (MTU Aero Engines) im September 2014 [28, 122]. Im Hochdruckbereich der Turbine, wo TiAl-Schaufeln vor Hochtemperaturoxidation geschützt werden müssen, setzen die Entwickler derzeit jedoch auf Legierungen auf NbSi-Basis [129] als neuen Werkstoff. Auch in der Automobiltechnik spricht vieles dafür, die heutzutage gängig verwendeten Turboladerrotoren aus TiAl-Werkstoffen herzustellen. Zunächst für den japanischen Markt (wo wegen des geltenden Tempolimits niedrigere Belastungen auftreten) bauen Mitsubishi [188] und Subaru teilweise TiAl-Rotoren in einige Modelle seit 1998 ein [98, 78]. Auch die Firma Porsche setzt im *Panamera* γ -TiAl-Rotoren ein [55]. Hauptsächlich die Legierung TiAl6V4 nutzen auch andere Automobilhersteller für diverse Bauteile [57].

Die geringere Dichte bringt nicht nur einen direkten Vorteil beim Bauteilgesamtgewicht. Zudem kann der tragende Bauteilquerschnitt schmaler ausgelegt werden. Bereits eine Reduzierung der Dichte um $\frac{1}{3}$ könnte zu einer Gewichtseinsparung um die Hälfte führen [56]. Weiter

wird das reduzierte Trägheitsmoment in deutlich verbessertem Ansprechverhalten rotierender oder schnell bewegter Bauteile resultieren.

2.1 Gewinnung und Herstellung

Ausgangspunkt für das Kroll-Verfahren ist natürliches Rutil (TiO_2), welches auch durch HCl-Laugung aus dem kostengünstigeren Illmenit (FeTiO_3) erzeugt werden kann. Rutil wird durch Zugabe von Chlor und Koks bei 750–1000 °C zu Titan-tetrachlorid (TiCl_4) reduziert. In der Regel folgt eine fraktionierte Destillation, um Verunreinigungen herauszulösen. Im Kroll-Prozess wird TiCl_4 unter Schutzgas bei 800–900 °C durch die Zugabe von Mangan zum Titanschwamm mit einer Dichte von 1,2–3 g/cm³ [177] reduziert.¹ Nach weiterem Verdichten erhält man die „Compacts“, die mit den Legierungselementen (insbesondere Al) zu großen Elektroden zusammengefügt werden. Deren homogene Verteilung wird durch mehrfaches Umschmelzen erreicht, so werden z.B. für Aluminium nur Konzentrationsschwankungen $\leq 0,5$ At.-% akzeptiert [63]. Dabei werden auch Mn- und Cl-Rückstände vom Kroll-Prozess durch Ausgasen entfernt.² Da hohe Schmelztemperaturen nötig sind, stellt die dann sehr hohe chemische Reaktivität des Titans und insbesondere die Affinität zu Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff hohe Anforderungen an die Schmelztechnik [29]. Verunreinigungen lagern sich z.B. auf Zwischengitterplätzen im Kristallgitter oder an den Korngrenzen an und führen zu Gitterspannungen und damit zu einer starken Versprödung der Metall-Randzone. Die Versprödung von Metallen durch Wasserstoff [190] oder auch durch Sauerstoff [197] sind bekannte Mechanismen und wirken sich in einem Verlust an Festigkeit aus. Daher müssen vakuum-schmelzmetallurgische Verfahren angewendet werden (**Vacuum arc remelting**). Der schließlich entstehende Ingot ist das Halbzeug, das zu Bauteilen weiterverarbeitet werden kann.

Die Formgebung der TiAl-Bauteile ist durch verschiedene gusstechnische Verfahren (Feinguss, Schleuderguss) oder durch das Strangpressen und Schmieden von Ingots möglich. Für die **Gusstechniken** werden Vakuum-Lichtbogen-Schmelzen und Plasmaschmelzen im kalten Tiegel bzw. in Kaltwandinduktionstiegeln verwendet. Vorteil der Gussverfahren ist die Durchführbarkeit in near-netshape-Technologie, d.h. die weitergehende Bearbeitung betrifft nur noch eine Feinbearbeitung der Bauteile, oftmals ist gar keine Weiterbearbeitung nötig [136]. Ein **Zerspanen** der TiAl-Legierungen ist möglich, jedoch tritt wegen deren geringer Wärmeleitfähigkeit (von 11 W/K·m bei Raumtemperatur bis 20 W/K·m bei 600 °C, [184]) eine hohe Temperatur an Werkzeug und -stück und damit hoher Werkzeugverschleiß auf. Aus dem Ingot heraus können nach Trennen Bauteile bei Temperaturen über 900 °C (für γ -TiAl) **geschmiedet** werden, verwendet wird dafür eine Isothermieschmiedepresse mit beheizten Gesenken [4].

Die mechanischen Eigenschaften werden durch ein inhomogenes Gefüge mit unterschiedlicher Korngröße und Einschlüssen oder Lunkern stark negativ beeinflusst. Für hohe Anforderungen an die Wechselfestigkeit und Zuverlässigkeit der Bauteile ist nach [4] eine umformtechnische Herstellung (Schmieden oder Strangpressen) unumgänglich, da beim Gießen gezielte Gefügeeinstellungen, die in hohen Festigkeiten resultieren, nicht möglich sind. Wegen der hohen Ti-Reaktivität verursachen die prozesstechnischen Herausforderungen zur Erzielung ausreichender Homogenität hohe Kosten [98]. Mit der Legierung GE-48-2-2 konnten dennoch gegossene Bauteile erfolgreich in Anwendungen der Luftfahrtindustrie überführt werden.

Die **Pulvermetallurgie** ist ein neueres Verfahren, welches Legierungsproduktion und Formgebung in einem Arbeitsschritt vereint. Ausgangspunkt sind inertgasverdünnte TiAl-Pulver, die z.B. im HIP-Prozess heiß-isostatisch verpresst werden, wodurch die nötige Verdichtung erzielt

¹Einige neuere Verfahren zur Reduktion von Ti aus Rutil, wie z.B. der EDO-Prozess [30] sind in [54] dargestellt.

²Cl-Rückstände sorgen im Weiteren für Verwirrung bei Oxidationsexperimenten.

wird. Das Gefüge der so hergestellten Legierungen ist chemisch und strukturell sehr homogen. Es kann jedoch zu Mikroporen durch Gaseinschluss und zu keramischen Verunreinigungen kommen. Die Halbzeuge können Dank ihres gleichmäßigen Gefüges mittels thermomechanischer Umformprozesse wie Schmieden, Walzen und superplastischen Umformtechniken bei Temperaturen oberhalb des spröde-duktilen Übergangs ($T \geq 700^\circ\text{C}$, vgl. Abb. 2.4, Mitte) weiterverarbeitet werden. Bauteile können aber auch near-netshape geHIPed werden (z.B. [87]), die Pulvermetallurgie ist daher ressourcenschonend. Die mechanischen Eigenschaften so hergestellter Bauteile entsprechen zum Teil denen der geschmiedeten und übertreffen in der Regel die der gusstechnisch hergestellten [136]. In einer aktuellen Weiterentwicklung werden TiAl-Pulver beim **Additive Manufacturing** verwendet, um in near-netshape TiAl-Bauteile mit einem 3D-Drucker herzustellen [189].

Problematisch bei allen Herstellungsrouten sind vor allem die sehr niedrige Raumtemperatur-Duktilität (vgl. Abb. 2.4, Mitte) und die Stabilität der γ -Phase bis hin zum hohen Schmelzpunkt, weshalb hohe Prozesstemperaturen notwendig sind.

2.2 Mechanische Eigenschaften

Eine Legierung von Titan mit Aluminium führt zur Ausbildung intermetallischer Phasen in Abhängigkeit vom Aluminiumgehalt. Dabei entstehen verschiedene Gitterstrukturen mit unterschiedlichen Eigenschaften. Ihre Bindung ist gekennzeichnet durch einen hohen metallischen Anteil und einem kleineren Anteil mit Atom- bzw. Ionenbindung. Trotz intensiver Forschung ist das Phasendiagramm der intermetallischen TiAl-Verbindung in einigen Details noch umstritten [130]. Abbildung 2.1 gibt den gegenwärtigen Stand wieder.

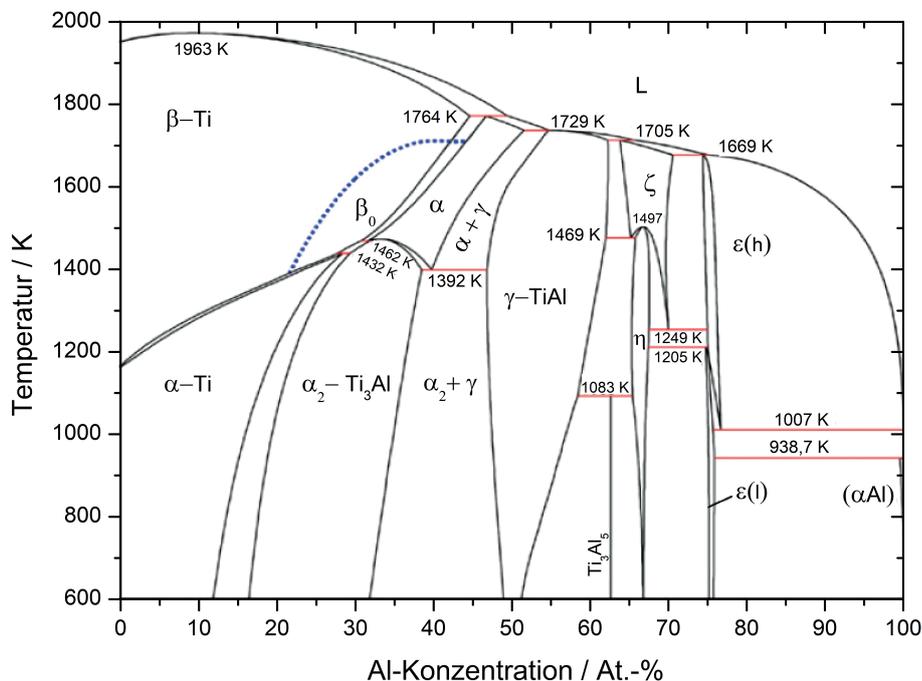


Abb. 2.1: Phasendiagramm der Titanaluminide [195].

Ebenso Gegenstand der Forschung ist das für die Oxidation wichtige ternäre System Ti-Al-O [142, 39] und, für Oxidation an Luft, das quaternäre System Ti-Al-O-N [173]. Die Phasengleichgewichte reagieren sehr empfindlich auf Verunreinigungen mit z.B. Sauerstoff, die sich auch durch den aufwendigen Herstellungsprozess nicht gänzlich vermeiden lassen. Die Gefü-