



Technische  
Universität  
Braunschweig

Institut für Werkstoffe



# Wärmebehandlung

J. Hansen, S. Vodde, J. Veer, T. Stein

Wintersemester 17/18

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Titanwerkstoffe</b>	<b>3</b>
1.1	Gefügemerkmale . . . . .	3
1.1.1	Alpha-Titan Phase . . . . .	3
1.1.2	Beta-Titan Phase . . . . .	3
1.1.3	Gefüge . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Methodik</b>	<b>6</b>
2.1	Wärmebehandlung . . . . .	6

# 1 Titanwerkstoffe

## 1.1 Gefügemerkmale

Wie andere Metalle liegt Titan in verschiedenen Gittermodifikationen beziehungsweise Phasenzuständen vor. Der Zustand ist von der Temperatur und den vorliegenden Legierungselementen abhängig. Bei reinem Titan liegt zwischen 1668°C und 882°C ein kubisch raumzentriertes Kristallgitter vor. Diese Phase wird als Betaphase ( $\beta$ -Phase) bezeichnet. Bei 882°C erfährt Titan eine Phasenumwandlung zu einem hexagonalen Gitter. Diese Phasenumwandlungstemperatur wird als Betatransus Temperatur bezeichnet und ist für jede Legierung unterschiedlich, denn die Legierungselemente haben Einfluss auf diese. [2].

Das hexagonale Gitter wird als Alphaphase ( $\alpha$ -Phase) bezeichnet. Wenn das Material langsam abgekühlt ist, liegt reines Titan bei Raumtemperatur nahezu vollständig als Alphaphase vor.

Dieses Gitter der Alphaphase ist annähernd dichtest gepackt. Das Verhältnis in der Zelle ist etwas kleiner, als dass in der am dichtesten gepackten Zelle, c:a von  $\alpha$ -Titan liegt bei 1.586. Die perfekte hexagonale Zelle hat ein Verhältnis von 1.624 [4], wobei c und a die Längen innerhalb einer Zelle sind. Je nach Aufbau der Zelle sind diese Längen unterschiedlich groß.

### 1.1.1 Alpha-Titan Phase

Die alpha-Titan Phase ist durch eine hexagonale Gitterstruktur gekennzeichnet. Dadurch entsteht ein anisotropes Werkstoffverhalten in einem Korn, beziehungsweise Einkristall. Ein Einkristall ist über ein homogenes, einheitliches Kristallgitter definiert. In einem Belastungsfall dieses Einkristalls ist das Werkstoffverhalten abhängig von der Belastungsrichtung im Verhältnis zur Gitterrichtung. Eine Kenngröße, die das elastische Verhalten eines Werkstoffes definiert, ist das Elastizitätsmodul. (formel einfügen) elche in Pascal angegeben. Das Elastizitätsmodul  $E$  reicht je nach Verhältnis, von minimal 100 GPa bis maximal 145 GPa.

Jedoch wird Titan sehr selten als Einkristall hergestellt, sodass die unterschiedliche Kornorientierung dafür sorgt, dass die Anisotropie der einzelnen Körner sich gegenseitig aufhebt. Somit kann man von einem isotropen Werkstoffverhalten ausgehen.

Der  $\beta$ - $\alpha$  Umklappvorgang kann auch martensitisch erfolgen. Dafür werden Abkühlgeschwindigkeiten von mindestens 500 K/s benötigt. Ein resultierender Martensit ist aber nicht zwangsläufig mit einer Festigkeitssteigerung verbunden, da es nicht wie beispielsweise im Martensit des Eisens, zu einer Gitterverzerrung kommt [4, vgl. ].

### 1.1.2 Beta-Titan Phase

Eine  $\beta$ -Phase ist ein Gefüge mit einer kubisch raumzentrierten Gitteranordnung. Dadurch resultiert ein homogenes Werkstoffverhalten.

Das E-Modul und die Festigkeit der Betaphase ist deutlich geringer als die der Alphaphase. Das E-Modul der Betaphase erreicht

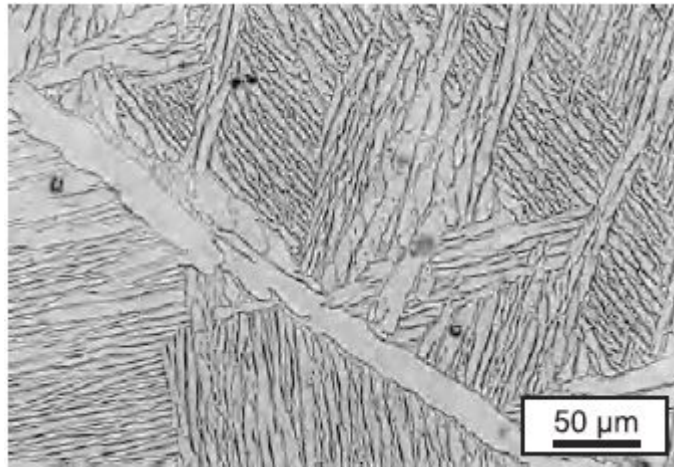


Abbildung 1.1: Vollamellares Gefüge [3]

Eine große Menge an  $\beta$ -Phase existiert in der Regel bei Raumtemperatur nur unter bestimmten Bedingungen. Sie kann als metastabile Phase auftreten, was bedeutet, dass das Material nicht vollständig den Phasenübergang abschließen konnte und so in dem Zustand aus höheren Temperaturen verblieben ist.

Durch Zusatz bestimmter Legierungselemente kann die  $\beta$ -Phase auch in größeren Mengen vorliegen. Dies wird im Kapitel betastabilisierende Legierungselemente näher erläutert.

### 1.1.3 Gefüge

Da sich die Arbeit vor allem mit Gefügeausprägungen und ihren Auswirkungen auseinandersetzt, werden die grundlegenden hier vorgestellt. Die jeweiligen Ausprägungen sind ausschlaggebend, wie sich das Material mechanisch verhält. Die mögliche Wärmebehandlung findet nach dem Rekristallisieren statt, sodass einige Gefügeausbildungen eventuell nicht möglich sind. Dies hängt von dem Ausgangsgefüge ab. Zusätzlich sind auch Kombinationen der einzelnen Gefüge möglich, um die Vorteile dieser hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften zu kombinieren.

#### Lamellar

Lamellare Gefüge entstehen aus einer Abkühlung aus dem  $\beta$ -Gebiet. Während des Abkühlens bilden sich in den Korngrenzen der  $\beta$ -Phase  $\alpha$ -Bereiche, die in das  $\beta$ -Korn hinein wachsen. Die  $\alpha$ -Bereiche wachsen erst in eine Richtung, bevor sie ihre Dicke erhöhen. Je nach Abkühlgeschwindigkeit entstehen so dünne oder dickere Nadeln. Die Abbildung 1.1 zeigt ein beispielhaftes Gefüge, indem voll lamellare Strukturen zu sehen sind und wird auch als Widmannstättengefüge bezeichnet. Des Weiteren ist das Gefüge durch fein parallel verlaufende Nadeln gekennzeichnet. Die Breite der einzelnen Nadeln hängt mit der Abkühlgeschwindigkeit zusammen. Für dieses Gefüge wurde eine schnelle Abkühlung gewählt, welche zu kleinen, feinen Nadeln führt. Außerdem darf die Abkühlgeschwindigkeit nicht zu hoch gewählt werden, da ansonsten ein martensitisches Gefüge entsteht.

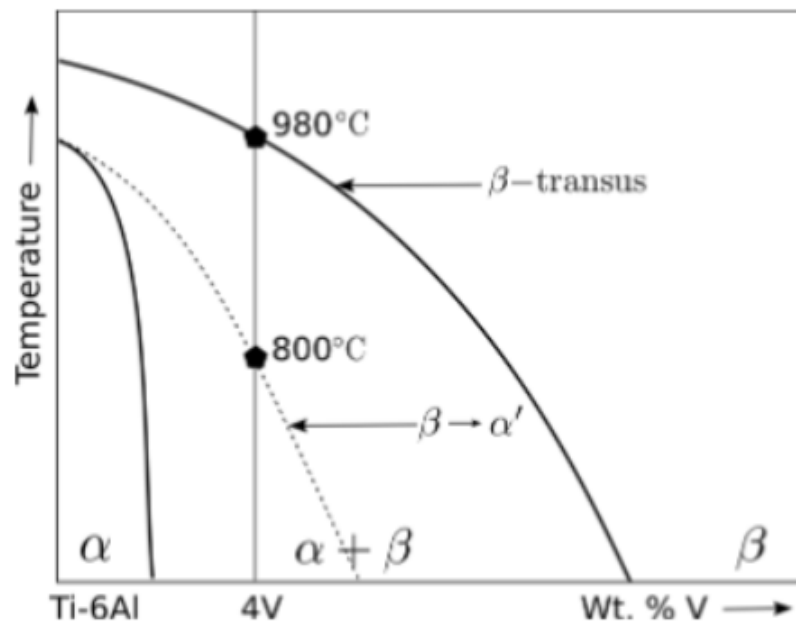


Abbildung 1.2: schematisches Phasendiagramm Ti-6Al-4V [1]

### Martensit

Der Martensit ist eine spezielle Form unter den Gefügen, da dieser der einzige ist in denen die Phasen metastabil vorliegen. Er resultiert aus einer schnellen Abkühlung bei Temperaturen höher als 800°C. Bei diesen Temperaturen ist das Volumenverhältnis zwischen  $\alpha$  und  $\beta$  in dem diese stabil vorliegen ein anderes als das bei niedrigen Temperaturen. Bei einer langsamen Abkühlung würde sich die Betaphase in Alphaphase umwandeln. Aufgrund der schnellen Abkühlgeschwindigkeit können diese Diffusionsvorgänge nicht abgeschlossen werden.

### Globular

### Bimodal

Bimodal Gefüge entstehen aus Glühvorgängen unterhalb der Betatransustemperatur. Es ist eine Kombination aus globularer  $\alpha$ -Phase und lamellarer Strukturen. Die globularen Anteile sind vorhanden, da die Glühungstemperatur zu niedrig ist für eine vollständig vorliegende Betaphase.

In dem Phasendiagramm aus Abbildung 1.2 ist zu sehen, dass eine Glühungstemperatur unterhalb Betatransus zu einem mehrphasigen Gefüge führt. Außerdem ist der  $\alpha$ -Anteil umso größer, je niedriger die Glühungstemperatur ist.

# 2 Methodik

## 2.1 Wärmebehandlung

Die Wärmebehandlung nach der Rekristallisation ist die letzte Methode um das Gefüge des Titans einzustellen. Hierbei kommt es auf Parameter wie Temperatur, Haltezeit und Abkühlmethode an. Um die bereits erwähnten Gefüge zu realisieren, ist eine spezifische Abfolge von einer beziehungsweise mehreren Stufen einer Wärmebehandlung nötig. Die grundlegenden Behandlungen werden in diesem Kapitel behandelt. Die speziellen, mehrstufige Behandlungen werden im dritten Kapitel behandelt.

**Temperaturkontrolle** Für die Temperaturkontrolle innerhalb der Wärmebehandlung kam ein Ofen zum Einsatz. Dieser kann bis Temperaturen weit über Betatransus (genaue Zahl) aufheizen und diese, mit einer Genauigkeit von drei Kelvin, halten. Der Ofen ist außerdem für die Aufheizgeschwindigkeit verantwortlich, da diese auch einen wichtigen Einfluss haben kann.

**Abkühlmedien** Durch Abkühlmedien werden bestimmte Abkühlgeschwindigkeiten realisiert. Für langsamere Abkühlungen als in der Luft wird der Ofen genutzt. Hier kann die Temperatur beliebig langsam reduziert werden. Ein weiterer Vorteil des Ofens ist, dass die Probe auf eine bestimmte Temperatur herunter gekühlt werden kann. Dies ist für mehrstufige Wärmebehandlungen wichtig, bei denen eine Abkühlung auf Raumtemperatur zwischen den Schritten vermieden werden soll.

Da der Ofen nicht überaus schnell abkühlen kann, wird zur schnelleren Abkühlung Luft mit Raumtemperatur verwendet. Durch den höheren Temperaturgradienten im Verhältnis zum Ofen wird so die Abkühlung beschleunigt.

Um noch schnellere Abkühlungen zu realisieren wird Wasser oder Öl verwendet. So werden zum Beispiel Abkühlgeschwindigkeiten für eine Martensitbildung ermöglicht. Gleichzeitig wird das Gefüge aus dem Hochtemperaturbereich eingefroren. Die Phasen liegen somit metastabil auf Raumtemperaturniveau vor. Metastabil bedeutet das die Phase unter normalen Umständen (vielleicht besser Bedingungen, im engl. würde ich conditions schreiben) nicht vorliegen würde. Die Phasenumwandlungen sind hier nicht möglich, da die Diffusionsgeschwindigkeiten bei Raumtemperatur zu gering sind, beziehungsweise eine Diffusion nicht stattfinden kann. Gleichzeitig ist die Abkühlgeschwindigkeit so groß, dass die Zeit in der Diffusionsvorgänge stattfinden können zu gering ist, damit sich die Phasen umwandeln können.

### Anpassung der Gefüge durch Wärmebehandlung

Das Anpassen der Gefüge ist das Ziel der Wärmebehandlungen. So werden Werkstoffeigenschaften gezielt für den jeweiligen Anwendungsfall optimiert, denn bestimmte Gefüge folgen aus bestimmten Wärmebehandlungen.

# Literaturverzeichnis

- [1] Bijish Babu. Physically based model for plasticity and creep of ti-6al-4v. Technical report, Luleå University of Technology Department of Applied Physics and Mechanical Engineering Division of Material Mechanics, 2008.
- [2] G. Lütjering and J.C. Williams. *Titanium*. Springer, 2007.
- [3] M. Peters and C. Leyens. *Titan und Titanlegierungen*. WILEY VCH Verlag GmbH, 2002.
- [4] Carsten Siemers. *Titan und Titanlegierungen*. Institut für Werkstoffe, 2007.

# Abbildungsverzeichnis

1.1	lamellares Gefüge . . . . .	4
1.2	Phasendiagramm . . . . .	5



# **Tabellenverzeichnis**