

656 | April 2011

## SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

Andreas Malletschek

# Einfluss von Titan auf den Entwurf von Unterwasserfahrzeugen

**TUHH**

Technische Universität Hamburg-Harburg

**Einfluss von Titan auf den Entwurf von Unterwasserfahrzeugen:** Andreas Malletschek,  
1. Auflage, Hamburg, Technische Universität Hamburg-Harburg, 2011,  
ISBN 978-3-89220-656-9

© Technische Universität Hamburg-Harburg  
Schriftenreihe Schiffbau  
Schwarzenbergstraße 95c  
D-21073 Hamburg  
<http://www.tuhh.de/vss>

# **Einfluss von Titan auf den Entwurf von Unterwasserfahrzeugen**

Vom Promotionsausschuss der  
Technischen Universität Hamburg-Harburg  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

von  
Dipl.-Ing. Andreas Malletschek

aus  
Lutherstadt Wittenberg

2011

Adressierung: urn:nbn:de:gbv:830-tubdok-10896

Vorsitzender des Promotionsverfahrens: Prof. Dr.-Ing. Thomas Rung

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dr.Ing. E.h. Dr.-Ing. h.c. Eike Lehmann

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Krüger

3. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Thomas Rung

4. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil Alexander Düster

Tag der mündlichen Prüfung: 31. März 2011

## Danksagung

Der Grundstein der vorliegenden Industriepromotion wurde im Rahmen meiner Tätigkeit als Entwicklungsingenieur bei der Howaldtswerke-Deutsche Werft GmbH in Kiel gelegt. Dazu möchte ich zunächst meinem Kollegen Thomas Hofmann für die Grundidee und Egon Hanssen, Marten Callsen sowie Klaus-Gerrit Mews für die organisatorische Unterstützung bei der Durchführung der Arbeit danken.

Weiterhin gilt mein Dank Prof. Dr.-Ing. Eike Lehmann und Prof. Dr.-Ing. Stefan Krüger für die Betreuung der Arbeit an der Technischen Universität Hamburg-Harburg, für die Vielzahl an Gesprächen zur Diskussion des Inhaltes der Dissertation und für die Offenheit gegenüber Themen aus der Industrie. Herrn Prof. Dr.-Ing. Rung möchte ich für die Übernahme des Vorsitzes des Promotionsverfahrens und Prof. Dr.-Ing. Düster für die Gutachtertätigkeit danken. Großer Dank gilt auch Jutta Henrici, die für mich viele organisatorische Fragen klärte sowie Dr.-Ing. Wilfried Abels, der mich bei der Veröffentlichung unterstützte.

Außerdem danke ich meinen Kollegen Marten Callsen, Christian Knop, Dietrich Köppe, Klaus Stegelmann, Joachim Böhm, Karsten Schütt und vor allem Michael Rudel für die Unterstützung hinsichtlich meiner fachlichen Fragen zur Uboot- und Werkstofftechnik. Auch den externen Projektpartnern Dr.-Ing. Andrey Gumenyuk (BAM Berlin), Johannes Schmidmayer (WIWeB Erding), Michael-Klaus Koch (ThyssenKrupp VDM Essen) und Alfons Lake (WTD91 Meppen) möchte ich für die ausgezeichnete Zusammenarbeit im Rahmen der Grundlagenforschung zum Laserschweißen und bei den Zulassungsuntersuchungen von Titan bedanken.

Diese Arbeit widme ich meinen Eltern, Großeltern und meiner Schwester, die mich familiär zu jeder Zeit unterstützt haben. Auch meiner Freundin gilt großer Dank für den Rückhalt, dass ich in einem großen Anteil meiner Freizeit diese Arbeit verfassen konnte.

Allen Freunden und Kollegen, die ich nicht alle in der Gesamtheit aufzählen kann, möchte ich ebenfalls für die Unterstützung danken.

Kiel, im März 2011

Andreas Malletschek



# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
2	Stand der Technik .....	2
	2.1 Einsatzgebiete in der Meerestechnik .....	2
	2.2 Problemanalyse .....	6
	2.3 Fazit .....	7
3	Ziele der Arbeit .....	8
4	Der Werkstoff Titan .....	9
	4.1 Allgemein .....	9
	4.2 Geschichte .....	9
	4.3 Gewinnung .....	9
	4.4 Verwendung .....	10
	4.5 Marktsituation .....	11
	4.6 Kosten .....	12
	4.7 Recycling .....	12
5	Materialeigenschaften und Werkstoffvergleich .....	13
	5.1 Allgemeiner Vergleich .....	13
	5.2 Vergleich Titan - Stahl .....	17
	5.3 Vergleich Titan - Aluminium .....	17
	5.4 Vergleich Titan - Faserverbundwerkstoffe .....	18
	5.5 Fazit .....	19
6	Titanwerkstoffe für die Meerestechnik .....	20
	6.1 Reintitan Ti1 - Ti4 .....	20
	6.2 Legierung TiAl6V4 .....	21
	6.3 Legierung TiAl3V2,5 .....	22
	6.4 Legierung TiCu2,5 .....	23
	6.5 Legierung TiAl5Sn2,5 .....	23
	6.6 Legierung TiV15Cr3Al3Sn3 .....	24
	6.7 Legierung TiAl4,5V3Mo2Fe2 (SP700) .....	24
7	Konstruktive Anwendungen .....	25
	7.1 Komponenten Innenschiff - allgemein .....	25
	7.2 Komponenten Außenschiff - allgemein .....	26
	7.3 Vorbetrachtung: Kraftübertragungs- und Stützelemente .....	26
	7.4 Druckkörper .....	30
	7.5 Druckkörperanbindung von Komponenten .....	30
	7.6 Druckkörperdurchführungen .....	31
	7.7 Lukendeckel .....	32
	7.8 Ausfahrgeräte .....	33

7.9	Propeller .....	37
7.10	Propellerwelle .....	41
7.11	Rudieranlage .....	45
7.12	Ankeranlage .....	50
7.13	Außendruckfeste Transportbehälter .....	54
7.14	Windensysteme .....	57
7.15	Ballistikschutz .....	58
7.16	Sonstige Ausrüstung .....	59
7.17	Sicherheits- und Rettungssysteme .....	59
7.18	Maschinenbaukomponenten .....	63
7.19	Waffensysteme .....	68
7.20	Tanks / Zellen .....	71
7.21	Wärmetauscher .....	78
7.22	Rohrleitungssysteme .....	79
7.23	Abgasanlage .....	82
7.24	Einrichtung und Stauung .....	83
7.25	Fazit.....	85
8	Druckkörper aus Titan.....	86
8.1	Aktueller Stand der Technik .....	86
8.2	Anforderungen an Druckkörperwerkstoff .....	86
8.3	Werkstoffkombination von Titan und Stahl .....	89
8.4	Druckkörperdimensionierung .....	89
8.5	Berechnungsbeispiel .....	90
8.6	Signaturen .....	92
8.7	Fazit.....	95
9	Teilprojekt: Laserschweißverfahren für Titanwerkstoffe .....	96
9.1	Ausgangssituation .....	96
9.2	Ziele des Entwicklungsvorhabens .....	96
9.3	Schweißverfahren.....	97
9.4	Untersuchungsergebnisse .....	97
9.5	Eignung für den Ubootbau.....	101
9.6	Eignung für den zivilen Schiffbau .....	102
9.7	Ausblick .....	102
10	Teilprojekt: Werkstoffzulassung im Schiffbau.....	103
10.1	Ausgangssituation .....	103
10.2	Ziele des Teilprojekts Werkstoffzulassung .....	103
10.3	Werkstoffeigenschaften + Legierungsauswahl .....	104
10.4	Prüfungen für Eignungsuntersuchung .....	104
10.5	Ermittlung der mechanisch-technologischen Kennwerte .....	105
10.6	Beultest .....	105

10.7	Fazit.....	110
11	Teilprojekt: Lukendeckel aus Titan.....	111
11.1	Aktueller Stand der Technik .....	111
11.2	Vor- und Nachteile eines Lukendeckels aus Titan.....	111
11.3	Lukendeckelentwurf.....	112
11.4	Variantenvergleich.....	113
11.5	Berechnung .....	114
11.6	Fazit.....	116
11.7	Patentanmeldung .....	116
12	Teilprojekt: Forschungstauchboot „ORCA“ .....	117
12.1	Druckkörperdimensionierung.....	117
12.2	Druckkörperdesign .....	120
12.3	Fazit.....	121
13	Zusammenfassung und Ausblick .....	123
14	Verzeichnisse und Quellenangaben .....	125



## 1 Einleitung

Die neueste Generation von maritimen High-Tech-Produkten aus den Bereichen militärischer und ziviler Schifffahrt stellt immer größere Anforderungen an deren Werkstoffauswahl und konstruktive Auslegung. Dazu zählen vor allem die Erhöhung der ertragbaren Belastungen und der Korrosionsbeständigkeit, die Verringerung des Gesamtgewichts und die Verlängerung der Lebensdauer. Um den stetig wachsenden Anforderungen gerecht zu werden, ist deshalb der Einsatz von High-Tech-Materialien bei Ubooten, Marineüberwasserschiffen, zivilen Schiffen sowie deren Komponenten unabdingbar. Vor allem die derzeit auf dem Markt verfügbaren Titanwerkstoffe stellen aufgrund ihrer hohen Festigkeit, geringen Dichte und exzellenter Korrosionsbeständigkeit eine Alternative zu den herkömmlichen Stahlwerkstoffen dar.

Diese vorliegende Dissertation beschäftigt sich mit Untersuchungen zum Einfluss von Titan auf den Entwurf von Unterwasserfahrzeugen und deren Komponenten, wobei sowohl die notwendigen Anforderungen an Werkstoffe, als auch mögliche Einsatzgebiete diskutiert werden.



Abbildung 1 - Unterseeboot U31 der Deutschen Marine [1]

Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Optimierung der Korrosionsbeständigkeit und der Erhöhung des Leistungsgewichts von festigkeitskritischen Komponenten, angefangen von Kleinteilen bis hin zum kompletten Druckkörper aus Titan.

## **2 Stand der Technik**

Der Werkstoff Titan war in der Vergangenheit auf dem Weltmarkt entweder nur begrenzt oder mit sehr hohen Preisen verfügbar, weshalb der großflächige Einsatz in der Meerestechnik weitestgehend vermieden wurde. Erst mit der Verbesserung der Weltmarktlage, den steigenden Kosten für Spezialstähle und der erfolgreichen Anwendung von Titanwerkstoffen in Offshore-Anlagen ist nun auch ein ausgeprägter Einsatz in der Meerestechnik denkbar.

### **2.1 Einsatzgebiete in der Meerestechnik**

In diesem Abschnitt werden die einzelnen Anwendungsgebiete in der Meerestechnik und die daraus resultierenden Anforderungen dargestellt.

#### **2.1.1 Allgemeine Anforderungen**

Der Einsatz von Konstruktionen in der Meerwasserumgebung stellt eine besondere Herausforderung für die Werkstofftechnik dar. Man unterscheidet dabei zwischen drei verschiedenen Einsatzbereichen von Komponenten im Außenbereich von meeres-technischen Systemen:

- Dauertauchzone: dauerhaft im Meerwasser befindlich
- Wechseltauchzone: Umgebungswechsel zwischen Meerwasser und Seeatmosphäre
- Spritzwasserzone: dauerhaft in der Seeatmosphäre befindlich

Aufgrund des weltweiten Einsatzes, können sich die Umgebungsbedingungen (Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit, Salzgehalt, Mikroorganismengehalt) sehr stark unterscheiden.

#### **2.1.2 Zivile Meerestechnik**

Die Anforderungen durch die zivile Meerestechnik lassen sich aufgrund der stark differenzierenden Einsatzgebiete nicht allgemein darstellen. Deshalb wird in den folgenden Betrachtungen zwischen dem zivilen Schiffbau und der Meeresforschung unterschieden.

##### **2.1.2.1 Ziviler Schiffbau**

Im Handelsschiffbau besteht die Tendenz zu möglichst kostengünstigen Schiffen mit kurzer Entwicklungs- und Produktionszeit, hoher Stückzahl und einer langen Lebensdauer. Mögliche Anwendungen von Titan beschränken sich somit sowohl bei den Standard- als auch Spezialschiffen nur auf Bereiche mit extremen Anforderungen (Bsp. Rohrleitungen, Wärmetauscher, etc.).



Abbildung 2 - Containerschiff [F1]

Eine Definition der Anforderungen ist deshalb nur projektbezogen möglich. Generell sind jedoch die werkstoffseitigen Anforderungen im Vergleich zum Militärschiffbau als geringer einzuschätzen (Bsp. Schockprüfungen, Beulversuche, u.s.w.). Aufgrund des allgemein sehr hohen Materialbedarfs, beispielsweise bei Containerschiffen und der zu erwartenden relativ hohen Produktionskosten (Materialkosten Titan  $\approx$  10x Stahl) gegenüber den Stahlschiffen, ist der Einsatz von Reintitan und Titanlegierungen weitestgehend unwirtschaftlich. In der vorliegenden Dissertation werden deshalb Containerschiffe nicht weiter betrachtet. Eine Aussage über den Einsatz von Kleinkomponenten ist in Anlehnung an die Betrachtungen für den Unterwassereinsatz dennoch möglich.

### **2.1.2.2 Meeresforschung**

In der Meeresforschung ist die Nachfrage nach Hochleistungswerkstoffen aufgrund der geringen Stückzahlen, der meist guten Finanzsituation und extremen technischen Anforderungen durchaus gegeben. Dabei sind folgende Einsatzgebiete denkbar:

- Roboter und Messgeräte für Flachwasser- und Tiefseeforschung



Abbildung 3 - Tauchroboter „Nautile“ [13]

- Langzeitbeständige Mess- und Warnsysteme (Bsp. für Tsunamis, Erdbeben)
- Fischereiforschung

Aus diesen Einsatzgebieten ergeben sich unter anderem folgende Forderungen an die Werkstoffe:

- hohe Festigkeiten, geringe Dichte → Reduzierung von Bauraum und Gewicht
- Druckfestigkeit bis zu 1000 bar (Tiefseeforschung)
- Korrosionsbeständigkeit vom Kurzeiteinsatz (Bsp. Roboter) bis zu dauerhaft im Meerwasser befindlichen Komponenten (Unterwassersensoren)
- geringer Wartungsaufwand bis Wartungsfreiheit (Bsp. Vermeidung von Beschichtungen)

Die kostengünstige Verarbeitung der Werkstoffe besitzt bei diesem Anwendungsgebiet aufgrund der geringen Abmessungen und begrenzten Stückzahlen nur eine sekundäre Bedeutung. Die funktionelle Materialauswahl ist somit ausschlaggebend.

### **2.1.2.3 Industrielle Meerestechnik**

In der industriellen Meerestechnik ist der Einsatz von Reintitan und Titanlegierungen schon relativ weit verbreitet, beispielsweise in Meerwasserentsalzungsanlagen und Offshore-Anwendungen. Dort werden vor allem Rohrleitungssysteme aus diesen Werkstoffen zur Reduzierung des Wartungsaufwands eingesetzt. Die daraus resultierenden Forderungen an die Verwendung von Titan begrenzen sich somit hauptsächlich auf eine hohe Langzeitkorrosionsbeständigkeit, ein geringes Gewicht und niedrige Systemkosten.



Abbildung 4 - Ölbohrinsel „SEADRILL WEST AQUARIUS“ [www.oilrig-photos.com, 13.07.2010]

### 2.1.3 Militärische Meerestechnik

In der Militärtechnik konzentrieren sich die Realisierbarkeitsbetrachtungen analog zur Meeresforschung primär auf die Funktionen und nur sekundär auf die Kosten eines technischen Systems. Dieser Umstand begünstigt die Einführung neuer Werkstoffe wie beispielsweise Titan auf Überwasser- und Unterwasserfahrzeugen.

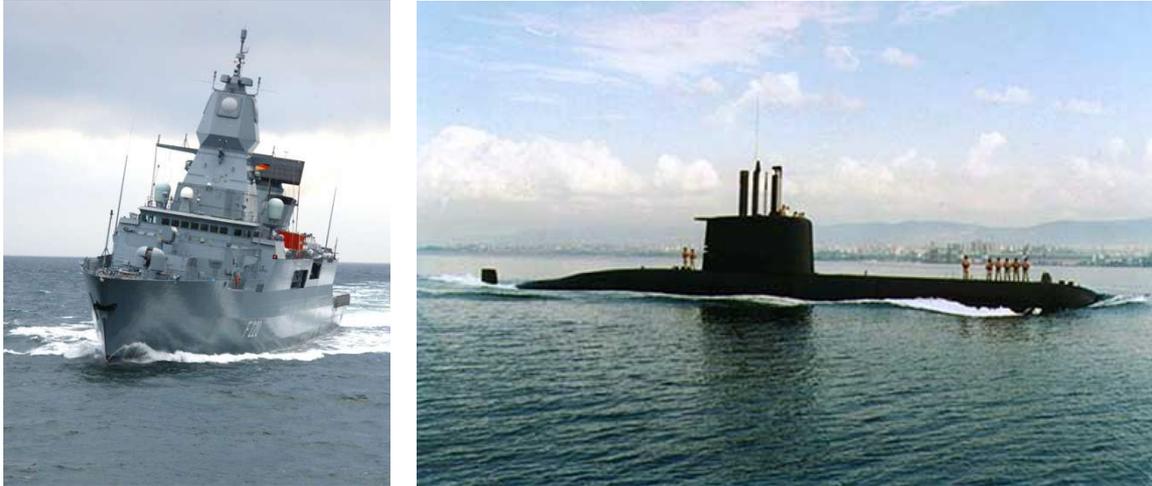


Abbildung 5 - Fregatte (links), Uboot (rechts) [F1]

Aus diesen Einsatzgebieten ergeben sich unter anderem folgende Forderungen an die Werkstofftechnik:

- hohe Festigkeiten, geringe Dichte → Reduzierung von Bauraum und Gewicht
- Druckfestigkeit bis zu 100-150 bar
- Langzeitkorrosionsbeständigkeit (Lebensdauer ca. 30 - 40 Jahre)
- Schockbeständigkeit gegen Detonationen (speziell Uboote & Kampfschiffe)
- hohe Schadenstoleranz
- hohe Brandbeständigkeit
- hohe Schwingungsdämpfung → geringe akustische Signaturen
- geringe magnetische Signaturen → Schutz gegen magnetfeldsensierende Waffen
- geringer Wärmeleitkoeffizient → geringer Einfluss der Meerwassertemperatur auf die Bootsysteme + geringe Signaturen durch Wärmeleitung nach außen)
- gute Verarbeitbarkeit, da hoher Materialbedarf (Bsp. Schiffsrumpf)
- sehr gute Schweißbarkeit

### 2.1.4. Zusammenfassung

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass aufgrund der hohen Anforderungen in den Bereichen der zivilen Forschung und militärischen Meerestechnik für viele Anwendungen keine Standardlösungen auf dem Markt verfügbar sind und somit der

Einsatz von Sonderwerkstoffen projektbezogen möglich ist. Bei der bisherigen Verwendung von Titan ist auffällig, dass diese Werkstoffgruppe meist in hochkorrosiven Umgebungen und weniger in mechanisch anspruchsvollen Systemen (Bsp. Rohrleitungen, Tanks, etc.) eingesetzt werden. Eine gesicherte Anwendung bei mechanischen Funktionselementen bleibt noch zu prüfen.

## **2.2 Problemanalyse**

Aufgrund der stetig wachsenden Anforderungen an Funktion, Bauraum, Gewicht und Kosten ist der Einsatz von Hochleistungswerkstoffen in der Meerestechnik zukünftig unabdingbar. Zum derzeitigen Stand der Technik ist jedoch die weitreichende Verwendung von Reintitan und Titanlegierungen aufgrund folgender Probleme im Schiffbau noch nicht vollständig geklärt:

1. Materialeigenschaften
2. Korrosionseigenschaften
3. Verarbeitung
4. Werkstoffzulassung

### **2.2.1 Materialeigenschaften**

Zum derzeitigen Stand der Technik für den Einsatz von Titan im Schiffbau existieren kaum ausführliche, schiffbaubezogene Materialuntersuchungen. Eine Verwendung dieser Werkstoffe wird deshalb durch eine Vielzahl der Konstrukteure aufgrund fehlender Untersuchungen verworfen. Das Problem sind somit die unzureichenden Grundlagen über die meeresstechnischen Werkstoffeigenschaften von Titan.



### **2.2.2 Korrosionseigenschaften**

Die Korrosionseigenschaften von Reintitan und Titanlegierungen sind bereits durch die Industrie weitgehend erforscht. Eine meerestechnische Beurteilung der Eigenschaften, speziell für den Bereich Schiffbau, ist jedoch noch offen.

### **2.2.3 Verarbeitung**

Die derzeitigen Anwendungen von Reintitan und Titanlegierungen beschränken sich größtenteils auf relativ kleine Bauteilabmessungen (Bsp. Rohre, Tanks, kleine Druckkörper). Für den weitreichenden Einsatz im Schiffbau sind jedoch wesentlich größere Bauteilabmessungen notwendig (Bsp. Sektionen aus Titan, Masten, Deckaufbauten). Zur Herstellung dieser großen Komponenten ist eine ausführliche Untersuchung der derzeitigen Fertigungsverfahren, speziell der Schweißeigenschaften, notwendig.

### **2.2.4 Werkstoffzulassung**

Für zivile und militärische Anwendungen der Titanwerkstoffe als Druckkörpermaterial existieren derzeit weder Materialzulassungen noch entsprechende Bauvorschriften (Bsp. BV 1050: Zulassung von Druckkörperwerkstoffen) seitens des Bundesamts für Wehrtechnik und Beschaffung (BWB) oder des Germanischen Lloyds (GL). Der Einsatz dieser Werkstoffe für Druckkörper und dessen Bestandteile (Bsp. Lukendeckel, Tanks, etc.) ist derzeit somit nicht möglich.

## **2.3 Fazit**

Der Grund für den bisherigen Verzicht auf Titan im Schiffbau ist nicht das Material selbst, sondern die fehlenden Grundlagen bzw. Analysen und Bewertungen der Materialeigenschaften für einen erfolgreichen Einsatz in der schiffbaulichen Konstruktion.

### 3 Ziele der Arbeit

Das Ziel der vorliegenden Dissertation ist die Erarbeitung von Grundlagen für den Einsatz von Reintitan und Titanlegierungen in der zivilen und militärischen Meerestechnik, sowie die Analyse und Bewertung des Einflusses von Titan auf den Entwurf von Unterwasserfahrzeugen. Sie dient somit als „Konstruktionshandbuch“ für die Verwendung von Titan in meerestechnischen Systemen. Dazu sind folgende Punkte zu bearbeiten:

1. Erarbeitung von Werkstoffgrundlagen
2. Untersuchung und Bewertung der Materialeigenschaften hinsichtlich der generellen Einsatzbarkeit in der Meerwasserumgebung
3. Ermittlung von Konstruktions-, Fertigungs- und Montagebedingungen
4. Untersuchung und Bewertung von Anwendungsmöglichkeiten in verschiedenen Bereichen eines Schiffes am Beispiel von Unterwasserfahrzeugen
5. Entwurfsberechnungen für schiffstechnische Komponenten und deren Analyse hinsichtlich funktioneller und wirtschaftlicher Eignung
6. Untersuchung von Schmelzschweißverfahren als Basis für den Einsatz in Großkonstruktionen
7. Werkstoffzulassung für den Einsatz auf militärischen Überwasser- bzw. Unterwasserfahrzeugen nach Bauvorschrift 1050 des BWB



Abbildung 7 - Uboot Klasse 212A [F1]

Im folgenden Kapitel werden zunächst die Eigenschaften des Werkstoffes Titan beschrieben. Alle chemischen und physikalischen Eigenschaften sind im Anhang dargestellt.

## 4 Der Werkstoff Titan

In Anlehnung an die Quellen [I2], [P25], [F2] und [I4] werden in diesem Kapitel zunächst der Werkstoff Titan vorgestellt und anschließend die Marktsituation sowie die Kosten dargestellt.

### 4.1 Allgemein

Titan ist ein chemisches Element, welches in der Erdkruste weit verbreitet ist und mit 0,41 Gewichtsprozent an zehnter Stelle in der Elementenhäufigkeit steht. Es ist in zahlreichen Gesteinen und Mineralien verfügbar, tritt jedoch niemals elementar auf. Zu den wichtigsten Mineralien gehören Titandioxid ( $\text{TiO}_2$ ), Titanit ( $\text{CaTi}[\text{SiO}_4]$ ), Perowskit ( $\text{CaTiO}_3$ ) und Ilmenit ( $\text{FeTiO}_3$ ). Die wichtigsten Vorkommen liegen in Südafrika, USA, Brasilien, Russland, Skandinavien und Kanada.



Abbildung 8 - 3 Modifikationen von Titandioxid (v.l. : Anatas, Brookit, Rutil) [I2]

### 4.2 Geschichte

Titan wurde erstmals 1791 durch den englischen Chemiker William Gregor entdeckt. Der deutsche Chemiker Heinrich Klaproth entdeckte es wenige Jahre später erneut und verlieh 1795 diesem Element den Namen Titan. Erst im Jahr 1910 gelang es Matthew A. Hunter reines Titanmetall herzustellen, die großchemische Erzeugung wurde jedoch erst 1946 mit der Entwicklung des Kroll-Prozesses (siehe unten) durch William Justin Kroll möglich.

### 4.3 Gewinnung

Für die großtechnische Herstellung von Titan eignen sich derzeit nur Rutil und Ilmenit (siehe oben). Zunächst wird aus diesen Rohstoffen Titan(IV)-Chlorid hergestellt, welches anschließend mit Magnesium (Kroll-Prozess) oder Natrium (Hunter-Prozess) zu Titanschwamm reduziert wird. Dieser Titanschwamm besteht bereits aus 55-65% Titan. Dieser wird anschließend nach dem Van Arkel - de Boer - Verfahren gereinigt

und in der darauf folgenden Einschmelzung je nach Bedarf mit Legierungsbestandteilen (z.B. Al, V, Mo, Sn, Ni, Nb) versehen. In zwei bis drei Einschmelzvorgängen wird das Material homogenisiert. Zuletzt werden die Rohblöcke durch Schmieden und/oder Walzen zum entsprechenden Halbzeug verarbeitet.

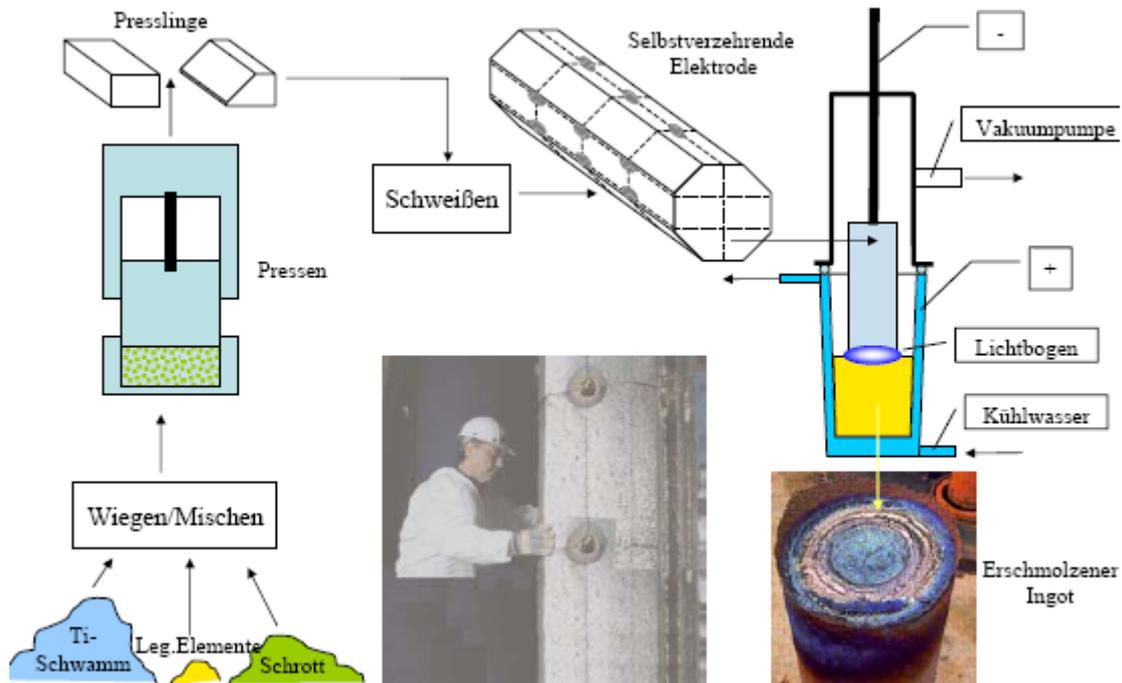


Abbildung 9 - Titangewinnung [P25, S.17]

Aufgrund der geringen Konzentration des Titans in den Mineralien und der aufwendigen Gewinnung von Reintitan bzw. Titanlegierungen sind diese Werkstoffe erheblich teurer als die herkömmlichen Stahlsorten.

#### 4.4 Verwendung

Titan ist ein Hochleistungswerkstoff, der aufgrund seiner vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten bereits erfolgreich in einem breiten industriellen Spektrum eingesetzt wird. Einige Beispiele für die Verwendung von Reintitan bzw. Titanlegierungen sind:

- Meerestechnik: Meerwasserentsalzungsanlagen, Ölbohrplattformen, Schiffskomponenten
- Flugzeug- und Raketenindustrie: Fahrwerks-, Flügel-, Turbinenkomponenten
- Chemischer Anlagenbau: Wärmetauscher, Behälter, Pumpen, Rohre
- Militärtechnik: Hubschrauber, Waffensysteme
- Medizintechnik: Implantate, Prothesen, Brillengestelle
- Sportindustrie: Tennisschläger, Golfschläger, Fahrräder
- Schmuckindustrie

### 4.5 Marktsituation

Die derzeit auf dem Markt verfügbaren Halbzeuge (Platten bis 100 mm Stärke, Stangen bis 850mm Durchmesser [F2]) sind ausreichend für den Bedarf der Meerestechnik, jedoch bleibt der Einsatz aufgrund der hohen Rohstoffpreise durch die aufwendige Gewinnung überwiegend der High-Tech-Industrie vorbehalten. Der europäische Verbrauch belief sich im Jahr 2005 auf ca. 20000t, wobei dieser Absatz folgenden Marktanteilen zuzuordnen ist:

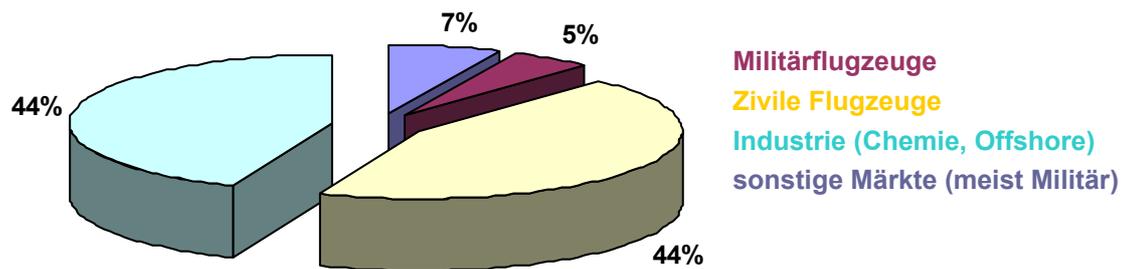


Abbildung 10 - Europäische Marktanteile 2005 [P2, S.3]

Die derzeitigen Hauptabnehmer für Titan sind somit die Industrie und der Flugzeugbau.



Abbildung 11 - Titanelemente im Airbus A350 [P2, S.6]

Der aktuell zu erwartende Bedarf im Bereich der Meerestechnik ist in Relation zu dem Bedarf in der Großindustrie als eher gering einzuschätzen. Dennoch ist die Beschaffung, speziell von größeren Mengen, aufgrund der starken Nachfrage in der

Flugzeugindustrie als schwierig einzuschätzen. Mit langen Wartezeiten bei der Materialbestellung ist deshalb zu rechnen.

#### 4.6 Kosten

Die derzeitigen Kosten für ein Kilogramm handelsüblichen Reintitan bzw. Titanlegierung belaufen sich auf ca. 20-40€ pro Kilogramm für Standardwerkstoffe und bis zu 120€ für Sonderlegierungen. Für einen direkten Kostenvergleich zu den herkömmlichen Stahlsorten sind jedoch außer dem Materialpreis noch andere anwendungsspezifische Faktoren wie beispielsweise Werkstoffeigenschaften (Dichte, Korrosion, Festigkeiten), Materialeinsatz, Fertigungs- und Wartungsaufwand zu prüfen.

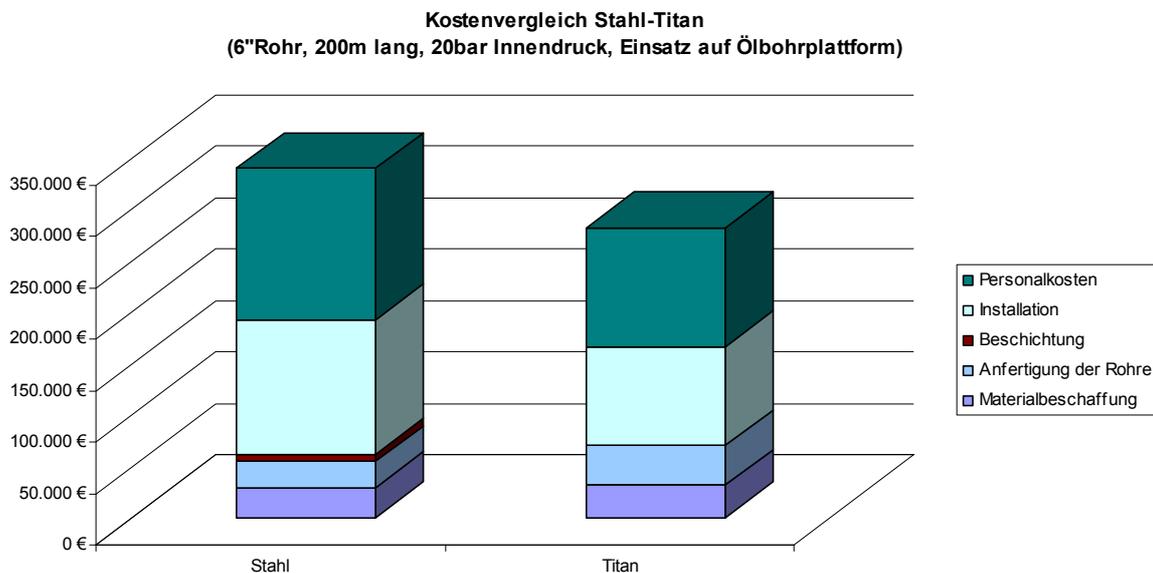


Abbildung 12 - Kostenvergleich [P9, S.5]

Aus dem Kostendiagramm für Anfertigung, Installation und Wartung eines Rohres für eine Ölbohrplattform ist ersichtlich, dass der Einsatz von Titanrohren deutlich kostengünstiger ist als die ursprüngliche Stahlausführung. Eine Aussage über die Systemkosten ist deshalb immer spezifisch zu analysieren, wobei auch der Instandhaltungsaufwand zu berücksichtigen ist.

#### 4.7 Recycling

Durch das wachsende Umweltbewusstsein in der Industrie ist die Recyclingfähigkeit beim Einsatz neuer Werkstoffe unbedingt zu untersuchen. Bei Reintitan und Titanlegierungen ist die Wiederverwendung möglich, so dass diese Materialien nach entsprechenden Reinigungsprozessen entweder für neue Titan-Halbzeuge oder als Legierung für titanstabilisierte Edelstähle verwendet werden können.

## **5 Materialeigenschaften und Werkstoffvergleich**

In diesem Kapitel werden die Materialeigenschaften von Titan und dessen Legierungen mit den im Schiffbau üblichen Werkstoffklassen verglichen. Die Grundlage dafür bilden die zusammengetragenen Werkstoffeigenschaften von Titan im Anhang.

### ***5.1 Allgemeiner Vergleich***

In der folgenden Tabelle werden verschiedene Werkstoffe miteinander verglichen. Die Auswahl dieser Materialien erfolgte unter Berücksichtigung der häufig verwendeten Werkstoffe in der Meerestechnik. Dabei ist jedoch zu beachten, dass durch die Zusammenfassung einzelner Metalllegierungen zu Materialklassen und der somit möglichen Differenzen der Werkstoffeigenschaften innerhalb der jeweiligen Klasse, in der folgenden Tabelle nur Anhaltswerte dargestellt sind. Für den anwendungsspezifischen Werkstoffeinsatz sind die genauen Materialkennwerte anhand der Normen bzw. Lieferbedingungen des Lieferanten einzusetzen. Die einzelnen Werkstoffparameter wurden anhand der jeweiligen Werkstoffnormen, Herstellerangaben und der Publikation [P12] ermittelt.

## 5 Materialeigenschaften und Werkstoffvergleich

Tabelle 1 - Vergleich von Werkstoffklassen

Materialklasse	Reintitan (3.7025, 3.7035, 3.7045, 3.7055)	niedrig legierte Titanlegierungen (Bsp. 3.7105, 3.7225, 3.7195)	hoch legierte Titanlegierungen (Bsp. 3.7165, 3.7175)	rostfreie Edelstähle in V2A-Qualität (Bsp. 1.4301, 1.4306, 1.4311)	rostfreie Edelstähle in V4A-Qualität (Bsp. 1.4571, 1.4462, 1.3964)	unlegierte Baustähle (Bsp. 1.0037, 1.0044, 1.0050)	legierte Vergütungsstähle (Bsp. 1.7033, 1.7218, 1.7225)	Schiffbaustahl HY80 & HY100	Aluminium und Aluminiumlegierun- gen	Kupfer und Kupferlegierungen	Kunststoffe	Faserverbund- werkstoffe
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	4,5	4,5 - 4,6	4,4 - 4,5	7,8	7,9 - 8,0	7,8	7,8	7,8	2,6 - 2,8	7,9 - 8,9	0,9 - 2,1	1,4 - 1,7
Dehngrenze bei T= 20°C [MPa]	240-480	240-440	400-900	170-650	190 - 460	185 - 360	550 - 1050	550 - 835	20 - 415	120 - 550	---	---
Zugfestigkeit bei T= 20°C [MPa]	350-640	350-560	560-1315	450 - 1000	490 - 950	290 - 830	700 - 1450	800-900	60 - 460	310 - 740	15 - 180	90 - 600
Elastizitätsmodul bei T= 20°C [GPa]	108-110	103-117	91 - 115	210	195 - 210	210	210	200	59 - 78	78 - 124	0,15 - 3,2	6 - 60
Torsionsmodul bei T= 20°C [GPa]	45	42	38 - 45	80	80	80	80	80	22 - 29	28 - 46	---	---
Bruchdehnung [%]	25 - 45	25 - 45	13 - 16	15 - 45	25 - 35	9 - 26	9 - 15	20	2 - 25	8 - 45	5 - 800	1 - 6
Kerbschlagarbeit [J]	27 - 83	27 - 83	34 - 41	90 - >100	55 - >100	27 - 40	27 - 60	50	3 - 32	10 - 43	0,1 - 3,2	---
Oberflächenhärte (Blech) [HB]	120-200	120-170	300 - 350	195 - 245	195 - 270	100 - 130	130 - 250	205 - 240	50 - 160	80 - 200	---	---
Reibungskoeffizient gegen gleichen Werkstoff (trocken)	0,6 - 1,0	0,6 - 1,0	0,6 - 1,0	0,1 - 0,2	0,1 - 0,2	0,1 - 0,2	0,1 - 0,2	0,1 - 0,2	1,04 - 1,05	0,18 - 0,4	0,2 - 0,6	0,2 - 0,6
elektrische Leitfähigkeit bei T= 20°C [m / Ω * mm <sup>2</sup> ]	1,8-2,1	0,4 - 0,5	0,5 - 0,6	1,2 - 1,3	1,2 - 1,3	8 - 9	8 - 9	3,5	16 - 32	15 - 48	---	---
Wärmeleitfähigkeit bei 20°C [W/mK]	20-22	6 - 19	6 - 8	14 - 15	14 - 15	40 - 60	32 - 45	25	160	150	0,1 - 0,4	0,8 - 40
mittlerer Wärmeausdehnungskoeffi- zient [10 <sup>-6</sup> /K] bei T= 20-200°C	9	8 - 10	8,1 - 8,3	13 - 16	13 - 17	12	11	11,8	21 - 24	16 - 20	0,02 - 0,95	2 - 80
Magnetisierbarkeit	sehr gering	sehr gering	sehr gering	sehr gering	sehr gering	hoch	hoch	hoch	sehr gering	sehr gering	---	----
Korrosionsbeständigkeit in Seewasser	sehr gut	sehr gut	sehr gut	gut	sehr gut	gering	mittel	gering	gering	mittel	sehr gut	sehr gut
Brandbeständigkeit	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	mittel	sehr gut	gering	gering
Zerspanbarkeit	gering	sehr gering	sehr gering	gut	gering	sehr gut	mittel	gut	sehr gut	mittel	sehr gut	sehr gut
Schweißbarkeit	sehr gut	sehr gut	gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	gut	gut	mittel	---
Materialkosten	hoch	hoch	sehr hoch	mittel	hoch	gering	gering	mittel	mittel	mittel	gering	mittel

### 5.1.1 Auswertung Festigkeiten

Anhand der Werkstofftabelle ist erkennbar, dass die Festigkeit der Titanlegierungen im Bereich der Vergütungsstähle liegt und somit wesentlich höher als die in der Meerestechnik der üblichen Edelstähle ist. Im folgenden Diagramm sind die verschiedenen Festigkeitskurven qualitativ dargestellt:

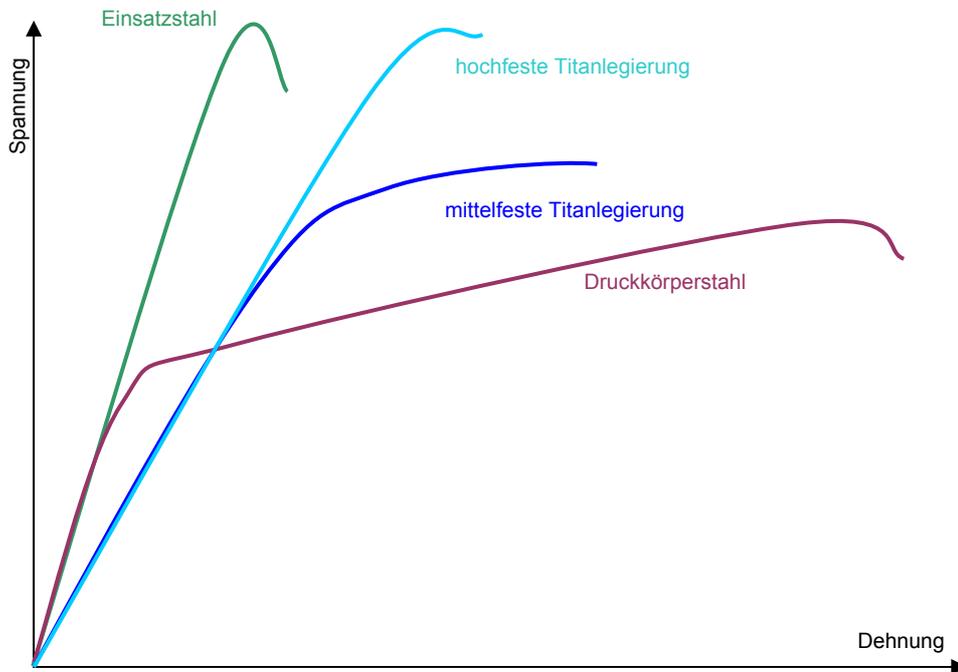


Abbildung 13 - qualitativer Werkstoffvergleich Zug-Dehnungskurven

Eine detaillierte Analyse und Bewertung der Festigkeitseigenschaften ist im Anhang zu finden. Weiterhin besitzt Titan eine deutlich geringere Dichte als Stahl. Bezieht man die Festigkeit auf die Dichte, so erhält man die folgenden Kennwerte:

Tabelle 2 - Festigkeit/Dichte - Vergleich der Werkstoffklassen

Werkstoffklasse	Dehngrenze / Dichte [MPa * cm <sup>3</sup> / g]	Zugfestigkeit / Dichte [MPa * cm <sup>3</sup> / g]
<i>Reintitan</i>	53 - 107	77 - 142
<i>niedriglegierte Titanlegierungen</i>	53 - 133	77 - 164
<i>hochlegierte Titanlegierungen</i>	88 - 204	<b>124 - 292</b>
<i>rostfreie Edelstähle in V2A-Qualität</i>	21 - 83	57 - 128
<i>rostfreie Edelstählein V4A-Qualität</i>	24 - 58	62 - 120
<i>Schiffbaustahl HY 80 &amp; HY100</i>	70 - 105	101 - 115
<i>unlegierte Baustähle</i>	23 - 46	37 - 106
<i>legierte Vergütungsstähle</i>	70 - 133	90 - 186
<i>Aluminium und Aluminiumlegierungen</i>	7 - 120	22 - 130
<i>Kupfer und Kupferlegierungen</i>	14 - 70	35 - 94

In dem folgenden Diagramm sind die werkstoffspezifischen Werte für die Dehngrenze, bezogen auf die jeweilige Dichte dargestellt:

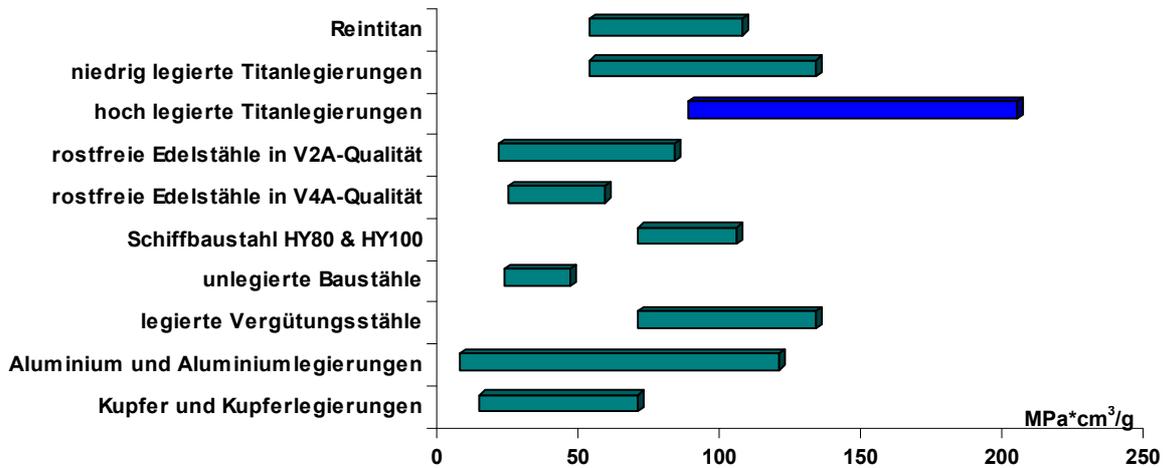


Abbildung 14 - Dehngrenze / Dichte - Vergleich

Aus dieser Abbildung ist ersichtlich, dass die Festigkeit von Titanlegierungen bezogen auf die Werkstoffdichte deutlich höher ist als bei den üblichen Werkstoffen, die in der Meerestechnik eingesetzt werden.

### 5.1.2 Auswertung Verformungseigenschaften

Bei der Dimensionierung von verformungskritischen Bauteilen ist darauf zu achten, dass Titanwerkstoffe nur einen geringen Elastizitäts- bzw. Schubmodul im Vergleich zu anderen Werkstoffen besitzen. In der folgenden Tabelle sind die Verformungen bei gleicher Belastung und gleichem Materialquerschnitt dargestellt. Betrachtet wird dabei nur das Verhältnis der Elastizitäts- bzw. Schubmodule:

Tabelle 3 - Vergleich der Verformungen

Werkstoff	Stahl	Titan	Aluminium- legierungen	Kupfer- legierungen
<b>Dichte</b>	1	0,57	0,34	1,06
<b>Zug- / Druckbeanspruchung</b>	1	1,97	2,99	2,03
<b>Biegebeanspruchung</b>	1	1,97	2,99	2,03
<b>Schubbeanspruchung</b>	1	1,93	3,14	2,16
<b>Torsionsbeanspruchung</b>	1	1,93	3,14	2,16

Das Ergebnis der Tabelle ist, dass sich Bauteile aus Titanwerkstoffen bei gleichem Widerstandsmoment gegenüber den Stahlkomponenten um den Faktor 2 stärker verformen. Diese Verformungen müssen bei der Auslegung der axialen Trägheitsmomente berücksichtigt werden.

## **5.2 Vergleich Titan - Stahl**

Die in der Meerestechnik am meisten verwendete Werkstoffklasse ist der Stahl, der sowohl als Bau- und Einsatzstahl wie auch als Edelstahl weitläufig verbreitet ist. In den folgenden Punkten wird der Einsatz von Titanwerkstoffen gegenüber den herkömmlichen Stählen verglichen:

### **Vorteile von Titan:**

- hohe bis sehr hohe dichtespezifische Festigkeiten
- geringere Dichte → Festigkeitserhöhung durch Materialverstärkung bei gleich bleibenden Gewicht möglich
- geringere Dichte → Gewichtsreduzierung bei gleich bleibender Festigkeit möglich
- deutlich erhöhte Korrosionsbeständigkeit in der Seewasserumgebung
- deutlich reduzierter Wärmeausdehnungskoeffizient
- teilweise geringere Preise im Vergleich zu hochlegierten Edelstähle

### **Nachteile von Titan:**

- geringer Elastizitäts- bzw. Torsionsmodul → bei gleichen Materialquerschnitten und Belastungsverhältnissen höhere Verformung als bei Stahlwerkstoffen
- zum Teil geringe Duktilität → Reduzierung der maximalen Verformbarkeit gegenüber den Stahlwerkstoffen
- hoher Reibungskoeffizient + hoher Verschleiß bei gleitenden Bewegungen → verminderte Einsetzbarkeit von Titanlegierungen als Gleitflächenwerkstoffe
- üblicherweise höhere bis deutlich höhere Materialkosten von Titan
- kleineres Spektrum an standardisierten Halbzeugen

## **5.3 Vergleich Titan - Aluminium**

Der industriell am häufigsten verwendete Leichtbauwerkstoff ist das Aluminium. In der folgenden Auflistung werden Titan und Aluminium hinsichtlich ihres Einsatzes in der Meerestechnik miteinander verglichen:

### **Vorteile von Titan:**

- hohe bis sehr hohe dichtespezifische Festigkeiten
- Korrosionsbeständigkeit in Seewasserumgebung → Aluminium nur mit Beschichtung beständig, dann aber geringe Schadensresistenz
- höheres E-Modul → höhere Steifigkeit bei gleichem Volumen
- höhere Temperaturstabilität → Einsatz von Speziallegierungen auch im Hochtemperaturbereich möglich
- Brandbeständigkeit

**Nachteile von Titan:**

- höhere Dichte
- höhere Materialkosten
- kleineres Spektrum an standardisierten Halbzeugen

**5.4 Vergleich Titan - Faserverbundwerkstoffe**

In den letzten Jahren bekamen vor allem Faserverbundwerkstoffe eine wachsende Bedeutung in der modernen Meerestechnik. Im Vergleich zu dieser Werkstoffklasse bietet Titan die folgenden Vor- und Nachteile:

**Vorteile von Titan:**

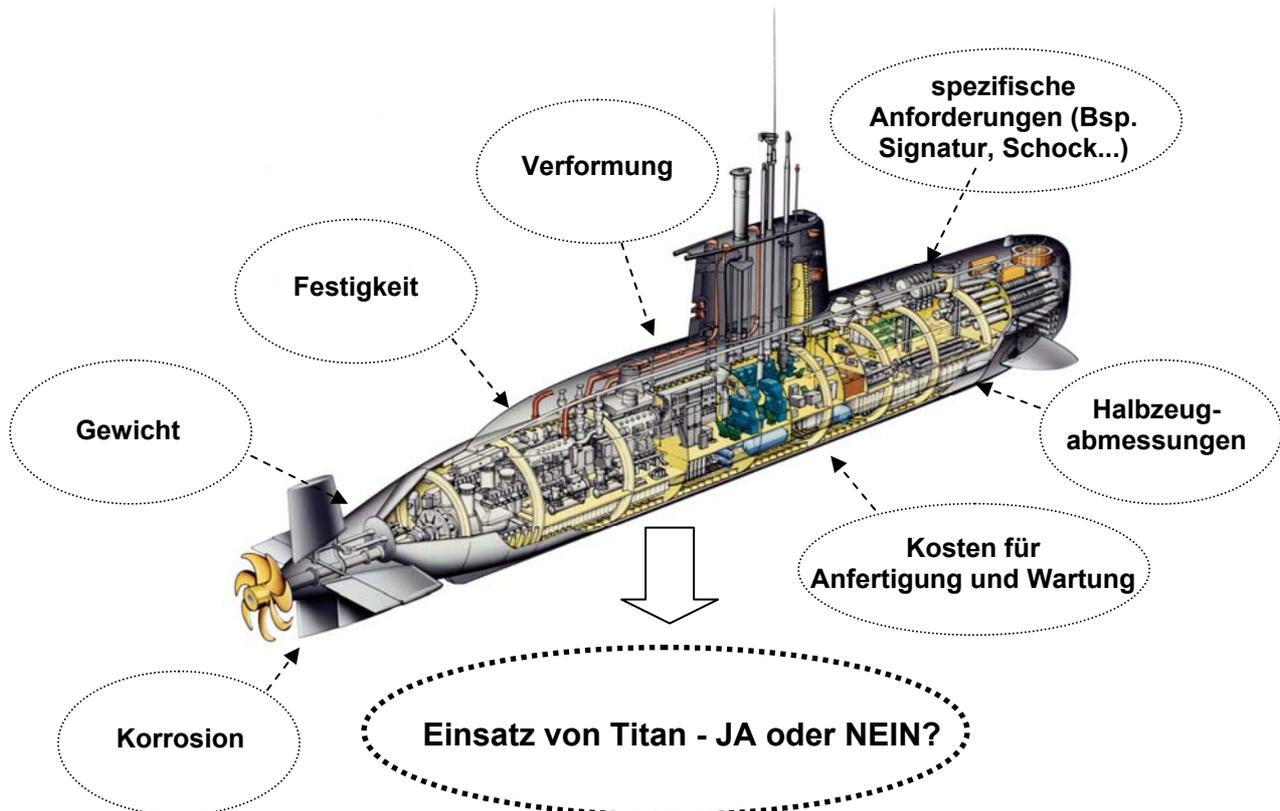
- hohe bis sehr hohe dichtespezifische Festigkeiten
- geringere Anisotropie der Werkstoffeigenschaften möglich (bei geringer Anzahl an Faserlagen)
- höhere Duktilität (Bruchdehnung) → Materialreserven in der Dimensionierung vorhanden
- höhere Temperaturstabilität → Einsatz von Speziallegierungen auch im Hochtemperaturbereich möglich
- Brandbeständigkeit
- höhere Langzeitbeständigkeit bei bestimmten Umgebungsbedingungen
- vielseitige Verarbeitungsmöglichkeiten (wie bei Stahl)
- Nachbearbeitung möglich (Ausfräsen von Durchgangsbohrungen, Anschweißen von Bauteilen usw.)
- üblicherweise geringere Kosten für Konstruktion, Berechnung und Fertigung (bei Einzelteilen und Kleinserien)

**Nachteile von Titan:**

- höhere Dichte → eventuell Gewichtserhöhung
- geringere Körperschalldämpfung
- geringere, gewichtsbezogene Festigkeiten (betrachtet in Faserrichtung)
- geringe, gewichtsbezogene Steifigkeiten (betrachtet in Faserrichtung)

### 5.5 Fazit

Aufgrund der Vielseitigkeit der Werkstoffeigenschaften als auch der notwendigen Anforderungen durch die jeweilige schiffbauliche Anwendung können keine allgemeingültigen Aussagen über Vor- und Nachteile von Titanwerkstoffen bezüglich eines möglichen Einsatzes getroffen werden. Vielmehr sind diese Eigenschaften immer produktspezifisch zu bewerten, wobei folgende Faktoren für die Dimensionierung der Komponenten zu berücksichtigen sind:



## 6 Titanwerkstoffe für die Meerestechnik

In diesem Kapitel werden Empfehlungen ausgewählter Titanwerkstoffe für den Einsatz in der Meerestechnik in Anlehnung an Materialeigenschaften und Wirtschaftlichkeit zum derzeitigen Stand der Technik gegeben. Bei den aufgeführten Materialkennwerten ist jedoch zu beachten, dass diese als Mindestwerte aus den jeweiligen Normen entnommen worden sind. Die tatsächlichen Kennwerte sind deshalb beim jeweiligen Materiallieferanten in Abhängigkeit des technischen Lieferzustands zu erfragen.

### 6.1 Reintitan Ti1 - Ti4

Die Werkstoffe Ti1, Ti2, Ti3 und Ti4 werden ohne Legierungszusätze hergestellt, besitzen demnach ausschließlich ein hexagonales  $\alpha$ -Gefüge und unterscheiden sich hauptsächlich durch den Gehalt an eingelagertem Sauerstoff. Sie besitzen eine ausgezeichnete Verfügbarkeit, besonders die Werkstoffe Ti1 und Ti2 sind in sämtlichen Lieferformen (Blech, Rohr, Stab, u.s.w.) standardisiert. Aufgrund der geringen Festigkeiten der Reintitanwerkstoffe ist die Anwendung jedoch auf Komponenten mit geringer Belastung beschränkt. Ein weiterer deutlicher Vorteil dieser Werkstoffklasse ist die ausgezeichnete Verarbeitbarkeit, basierend auf der hohen Duktilität des Reintitans.

Tabelle 4 - Werkstoffübersicht Ti1-Ti4

Werkstoff	Norm	Festigkeiten gem. ASM SB 265	Umformbarkeit	Schweißbarkeit
<b>Ti1</b>	DIN 17850-3.7025	$R_{p0,2} = 138\text{N/mm}^2$ $R_m = 240\text{N/mm}^2$ $A_5 = 24\%$	ausgezeichnet	ausgezeichnet
	ASM SB265-grade 1			
<b>Ti1 Pd</b>	DIN 17850-3.7225	$R_{p0,2} = 138\text{N/mm}^2$ $R_m = 240\text{N/mm}^2$ $A_5 = 24\%$	ausgezeichnet	ausgezeichnet
	ASM SB265-grade11 ASM SB265-grade17			
<b>Ti2</b>	DIN 17850-3.7035	$R_{p0,2} = 275\text{N/mm}^2$ $R_m = 345\text{N/mm}^2$ $A_5 = 20\%$	ausgezeichnet	ausgezeichnet
	ASM SB265-grade 2			
<b>Ti2Pd</b>	DIN 17850-3.7235	$R_{p0,2} = 275\text{N/mm}^2$ $R_m = 345\text{N/mm}^2$ $A_5 = 20\%$	ausgezeichnet	ausgezeichnet
	ASM SB265-grade7 ASM SB265-grade16			
<b>Ti3</b>	DIN 17850-3.7055	$R_{p0,2} = 380\text{N/mm}^2$ $R_m = 450\text{N/mm}^2$ $A_5 = 18\%$	sehr gut	ausgezeichnet
	ASM SB265-grade 3			
<b>Ti3Pd</b>	DIN 17850-3.7255	$R_{p0,2} = 380\text{N/mm}^2$ $R_m = 450\text{N/mm}^2$ $A_5 = 18\%$	sehr gut	ausgezeichnet
<b>Ti4</b>	DIN 17850-3.7065	$R_{p0,2} = 483\text{N/mm}^2$ $R_m = 550\text{N/mm}^2$ $A_5 = 15\%$	gut	ausgezeichnet
	ASM SB265-grade 4			

Für Anwendung in besonders korrosionsempfindlichen Komponenten ist die Verwendung von Palladium- oder Ruthenium-Legierungen empfehlenswert, da diese eine höhere Korrosionsbeständigkeit aufweisen.

## 6.2 Legierung TiAl6V4

Der Werkstoff TiAl6V4 ist eine der ältesten  $\alpha$ + $\beta$ -Titanlegierungen und zeichnet sich vor allem durch die hohen Festigkeiten und der ausgezeichneten Verfügbarkeit aus, ähnlich wie die Reintitanwerkstoffe. Allerdings ist die Verarbeitung dieses Werkstoffs aufgrund der relativ geringen Duktilität deutlich schwieriger, so dass Umformverfahren nur unter hohen Temperaturen durchgeführt werden können. Dennoch bildet dieser Werkstoff, aufgrund der guten Verfügbarkeit die Standardlegierung vor allem in Luftfahrt und Maschinenbau. Bei hoch belasteten, im Seewasser befindlichen Komponenten, ist wegen der Spannungskorrosionsempfindlichkeit der TiAl6V4-Legierung, deren ELI-Version („extra low interstitials“) zu bevorzugen. Für extrem korrosionsempfindliche Bauteile sind weiterhin die Palladium oder Ruthenium als zusätzliche Legierungselemente möglich.

Tabelle 5 - Werkstoffübersicht TiAl6V4

Werkstoff	Norm	Festigkeiten gem. ASM SB 265	Umformbarkeit	Schweißbarkeit
<b>TiAl6V4</b>	DIN 17852-3.7165 ASM SB265-grade 5	$R_{p0,2} = 828\text{N/mm}^2$ $R_m = 895\text{N/mm}^2$ $A_5 = 10\%$	mäßig	gut
<b>TiAl6V4- Pd</b>	ASM SB265- grade 24	$R_{p0,2} = 828\text{N/mm}^2$ $R_m = 895\text{N/mm}^2$ $A_5 = 10\%$	mäßig	gut
<b>TiAl6V4- ELI</b>	ASM SB265- grade 23	$R_{p0,2} = 759\text{N/mm}^2$ $R_m = 828\text{N/mm}^2$ $A_5 = 10\%$	mäßig	gut
<b>TiAl6V4- ELI-Ru</b>	ASM SB265- grade 29	$R_{p0,2} = 759\text{N/mm}^2$ $R_m = 828\text{N/mm}^2$ $A_5 = 10\%$	mäßig	gut

Aufgrund der relativ schwierigen Zerspanung werden derzeit Legierungszusätze wie beispielsweise Seltenerden untersucht, die das Spanverhalten deutlich verbessern. Eine vielversprechende Entwicklung bildet dabei das Forschungsprojekt der TU Braunschweig am Institut für Werkstoffe, bei dem mittels Hinzulegierung von Lanthan ein kurz brechender Span erzeugt und somit die Zerspanungsleistung deutlich erhöht werden kann (siehe auch [P19]).

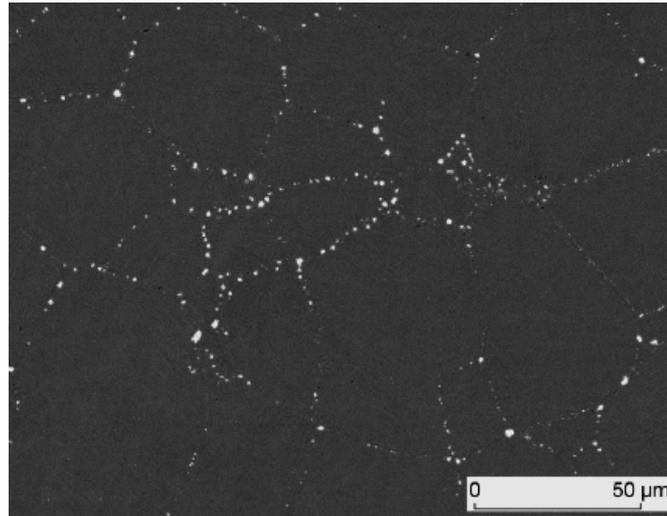


Abbildung 15 - TiAl6V4 mit Lanthan [P19]

Die Abbildung zeigt die Einlagerung von Lanthan an den Korngrenzen der Titanlegierung. Diese Elemente bewirken dabei eine Herabsetzung der Duktilität bei annähernd gleich bleibenden Festigkeitseigenschaften. Außerdem wird die Spanlänge beim spanabhebenden Verfahren deutlich reduziert und somit die Standzeit der Werkzeuge wesentlich erhöht.

### 6.3 Legierung TiAl3V2,5

Diese  $\alpha+\beta$ -Legierung wird durch ihre chemische Zusammensetzung auch als „half 6-4“ bezeichnet und bildet den Kompromiss zwischen den guten Verarbeitungsmöglichkeiten der Reintitanwerkstoffe und den hohen Festigkeiten der Legierung TiAl6V4. Vorwiegend wird er im Bereich der Rohrleitungen im Flugzeugbau eingesetzt und besitzt eine gute Verfügbarkeit.

Tabelle 6 - Werkstoffübersicht TiAl3V2,5

Werkstoff	Norm	Festigkeiten gem. ASM SB 265	Umformbarkeit	Schweißbarkeit
<b>TiAl3V2,5</b>	DIN 17852-3.7195 ASM SB265-grade 9	$R_{p0,2} = 483\text{N/mm}^2$ $R_m = 620\text{N/mm}^2$ $A_5 = 15\%$	gut	sehr gut
<b>TiAl3V2,5-Pd</b>	ASM SB265-grade 18	$R_{p0,2} = 483\text{N/mm}^2$ $R_m = 620\text{N/mm}^2$ $A_5 = 15\%$	gut	sehr gut
<b>TiAl3V2,5-Ru</b>	ASM SB265-grade 28	$R_{p0,2} = 759\text{N/mm}^2$ $R_m = 828\text{N/mm}^2$ $A_5 = 10\%$	gut	sehr gut

Aufgrund der hohen Festigkeiten, der relativ hohen Bruchdehnung und der guten Verfügbarkeit besitzt dieser Werkstoff ebenfalls ein enormes Potential für mögliche Anwendungen in der Meerestechnik.

#### 6.4 Legierung TiCu2,5

Diese relativ unbekannt und somit als Sonderwerkstoff zu betrachtende Legierung TiCu2,5 ist ebenfalls durch eine  $\alpha+\beta$ -Gefüge gekennzeichnet und kombiniert (wie die Legierung TiAl3V2,5) eine hohe Festigkeit mit einer guten Umformbarkeit. Jedoch ist die Verfügbarkeit dieses Werkstoffs im Vergleich zur TiAl3V2,5 eher gering.

Tabelle 7 - Werkstoffübersicht TiCu2,5

Werkstoff	Norm	Festigkeiten [P23]	Umformbarkeit	Schweißbarkeit
<i>TiCu2,5</i>	---	$R_{p0,2} = 460\text{N/mm}^2$ $R_m = 540\text{N/mm}^2$ $A_5 = 18\%$	gut	nicht ausreichend bekannt

Die Schweißbarkeit dieser Legierung ist nicht ausreichend bekannt. In [P23] wird zwar erwähnt, dass Schmelzschweißverfahren möglich sind, es wurde jedoch keine qualitative Aussage über die Schweißbarkeit getroffen. Somit sind vor Anwendung dieser Legierung in geschweißten Komponenten vorab Versuchsreihen notwendig.

#### 6.5 Legierung TiAl5Sn2,5

Diese  $\alpha+\beta$ -Legierung zeichnet sich vor allem durch die gute Stabilität und die geringe Oxidation bei hohen Temperaturen von bis zu 500°C aus und besitzt eine gute Verfügbarkeit auch als Schmiede- oder Gussteile.

Tabelle 8 - Werkstoffübersicht TiAl5Sn2,5

Werkstoff	Norm	Festigkeiten gem. ASM SB 265	Umformbarkeit	Schweißbarkeit
<i>TiAl5Sn2,5</i>	DIN 17852-3.7115 ASM SB265-grade 6	$R_{p0,2} = 793\text{N/mm}^2$ $R_m = 828\text{N/mm}^2$ $A_5 = 10\%$	mäßig	sehr gut
<i>TiAl5Sn2,5</i> <i>ELI</i>	---	$R_{p0,2} = 717\text{N/mm}^2$ $R_m = 779\text{N/mm}^2$ $A_5 = 10-15\%$ Werte aus [P23]	mäßig	sehr gut

Der Werkstoff TiAl5Sn2,5 ist ebenfalls eine der ersten kommerziellen Legierungen und wurde aufgrund der geringeren Verfügbarkeit in vielen Anwendungen mit

TiAl6V4 ersetzt. Allerdings ist auch bei diesem Werkstoff die relativ hohe Anfälligkeit gegenüber Spannungsrisskorrosion zu beachten.

### 6.6 Legierung TiV15Cr3Al3Sn3

Diese  $\beta$ -Legierung ist im Vergleich zu den anderen aufgeführten Werkstoffen als Exot zu bezeichnen und wegen der hohen Legierungsanteile deutlich kostenintensiver (Faktor >2). Aufgrund der hervorragenden mechanischen Eigenschaften und der guten Umformbarkeit ist dieser Werkstoff vor allem für Sonderanwendungen sehr interessant.

Tabelle 9 - Werkstoffübersicht TiV15Cr3Al3Sn3

Werkstoff	Norm	Festigkeiten [P23]	Umformbarkeit	Schweißbarkeit
<i>TiV15Cr3Al3Sn3</i>	---	$R_{p0,2} = 986\text{N/mm}^2$ $R_m = 993\text{N/mm}^2$ $A_5 = 22,5\%$	gut	mäßig

### 6.7 Legierung TiAl4,5V3Mo2Fe2 (SP700)

Die unter der Abkürzung SP700 bekannte  $\beta$ -Legierung verfügt über eine feine Mikrostruktur und weist sowohl eine ausgezeichnete Umformbarkeit als auch sehr hohe Festigkeiten bei relativ hoher Bruchdehnung auf (vergleiche Legierung TiV15Cr3Al3Sn3).

Tabelle 10 - Werkstoffübersicht TiAl4,5V3Mo2Fe2

Werkstoff	Norm	Festigkeiten [P23]	Umformbarkeit	Schweißbarkeit
<i>TiAl4,5V3Mo2Fe2</i>	---	$R_{p0,2} = 972\text{N/mm}^2$ $R_m = 1023\text{N/mm}^2$ $A_5 = 19\%$	gut	mäßig

Dieser Werkstoff ist jedoch nur eingeschränkt verfügbar und somit ausschließlich für Sonderanwendungen empfehlenswert.

## 7 Konstruktive Anwendungen

In diesem Kapitel werden verschiedene Komponenten hinsichtlich des Einsatzes von Reintitan und Titanlegierungen diskutiert. Dennoch ist der Einsatz von Titanwerkstoffen in der Konstruktionsphase für jede Anwendung individuell zu prüfen. Folgende Schiffselemente werden in diesem Kapitel betrachtet:

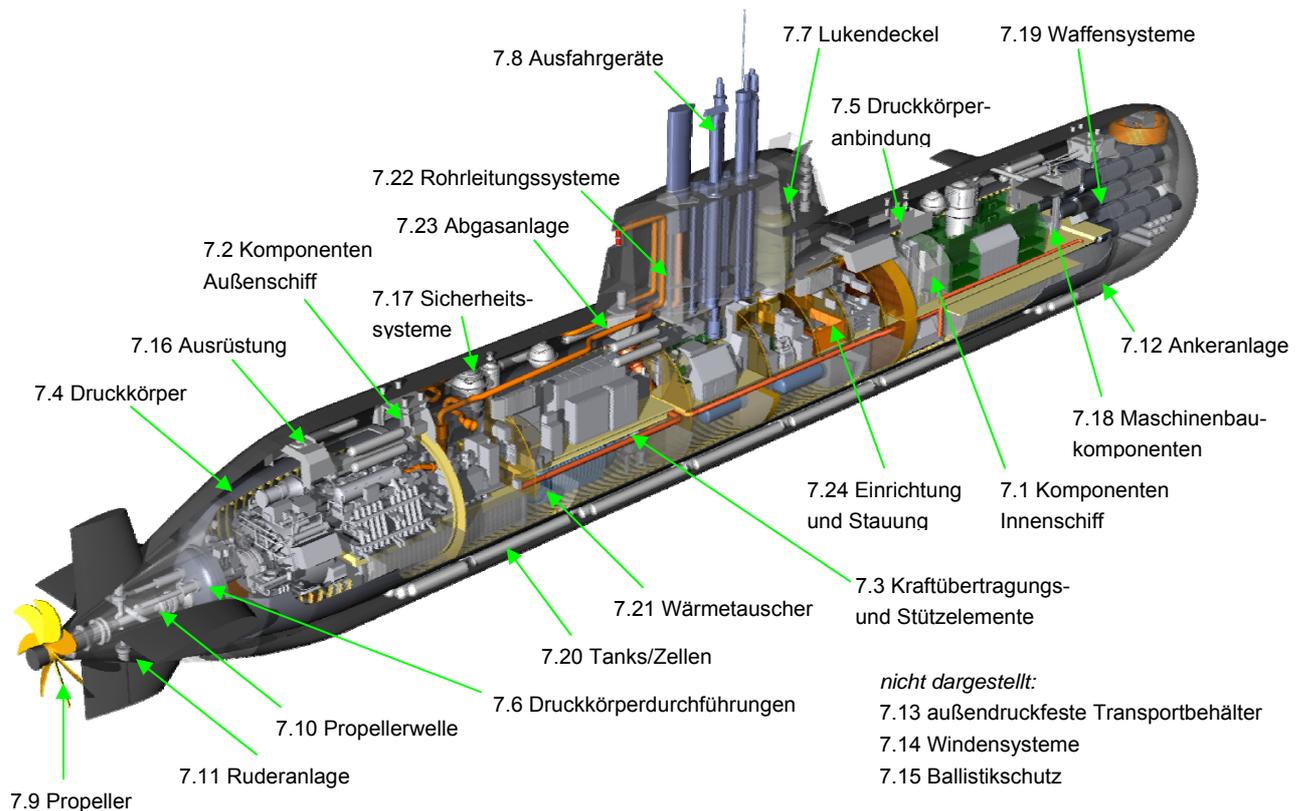


Abbildung 16 - Querschnitt Uboot 212A [F1]

### 7.1 Komponenten Innenschiff - allgemein

Die im Innenschiff liegenden Komponenten sind weder dem äußeren Wasserdruck, noch dem Meerwasser direkt ausgesetzt. Sie befinden sich in der Seewasseratmosphäre und unterliegen deshalb einer hohen Korrosionsbelastung. Der Einsatz von Titanwerkstoffen ist daher überall dort denkbar, wo Leichtbauwerkstoffe zur Verbesserung der Handhabung bzw. zur Gewichtsreduzierung des Gesamtsystems oder meerwasserbeständige Werkstoffe an korrosionsgefährdeten Stellen benötigt werden.

Für diese Anwendungen sind die auf dem Markt üblichen Titanwerkstoffe Ti1 - Ti4 (Grade 1-4) oder die „Allroundlegierung“ TiAl6V4 (Grade 5) empfehlenswert. Die dadurch möglichen Festigkeiten in Kombination mit einer hohen Gewichtersparnis und der hervorragenden Korrosionsresistenz macht diese Werkstoffe besonders

interessant für den Einsatz im Innenschiff. Dennoch sind die Kosten und der Nutzen für jede Anwendung genau zu prüfen.

## **7.2 Komponenten Außenschiff - allgemein**

Im Außenschiff sind alle Komponenten sowohl dem Wasserdruck als auch der Meerwasserumgebung direkt ausgesetzt. Dieser Umstand begünstigt den Einsatz von Titanwerkstoffen, da diese hervorragend korrosionsbeständig in allen Tauchzonen und bei den üblichen Temperaturen ( $-20^{\circ}\text{C}$  ...  $+70^{\circ}\text{C}$ ) sind. Es wäre somit hinsichtlich der Korrosionsresistenz möglich, blanke Titanoberflächen im Außenschiff einzusetzen. Dies ist jedoch aus folgenden Gründen nicht empfehlenswert (Funktionsflächen ausgenommen):

- Der Bewuchs im Außenschiff bewirkt keine Korrosionsprobleme von freiliegenden Titanoberflächen. Dennoch kann dieser durchaus funktionelle Probleme hervorrufen, die zum Ausfall von beweglichen Systemen führen können. Außerdem werden durch starken, großflächigen Bewuchs die Strömung an den jeweiligen Flächen und somit auch der Strömungswiderstand verändert. Dies kann bei großen Flächen zu erhöhtem Energieverbrauch und zu akustischen Problemen infolge von Wirbelbildung führen. Hinzu kommt die Verschlechterung des optischen Erscheinungsbildes.
- Freiliegende Titanoberflächen bilden in vielen Korrosionssystemen die Kathode. Je größer dabei die Kathodenfläche ist, desto größer ist auch die Korrosionsgeschwindigkeit an der Anode. Bei großen, freien Titanoberflächen werden somit kleine oxidierende Oberflächen sehr stark angegriffen und abgetragen. Die maximale Einsatzdauer beispielsweise von Opferanoden wird dadurch deutlich minimiert.
- Freiliegende Metalloberflächen stellen bei eisigen Klimabedingungen eine Gefahr dar, da bei ungeschütztem Hautkontakt ein Festfrieren auf dem Metall möglich ist.
- Im Militärschiffbau können silbern glänzende Oberflächen aufgrund der schlechten Tarneigenschaften zu einer Erhöhung der Signatur führen.

## **7.3 Vorbetrachtung: Kraftübertragungs- und Stützelemente**

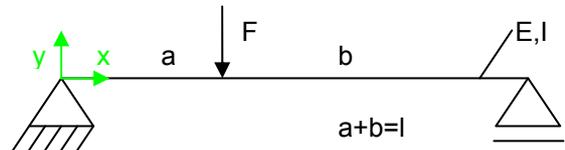
In diesem Teilkapitel werden einige spezielle Berechnungsformeln für die Werkstoffsubstitution von Stahl durch Titan für mechanische Funktionskomponenten (Bsp. Träger und Welle) entwickelt. Diese Formeln dienen zur Abschätzung bei der werkstoffgerechten Dimensionierung der jeweiligen Komponenten und werden in den folgenden Teilkapiteln als Basis verwendet. Grundlage für die Untersuchungen bilden Träger, die auf zwei Stützen gelagert sind. Für andere Lagerungsarten ist die Herleitung der entsprechenden Formeln äquivalent durchzuführen.

### 7.3.1 Biegebalken mit gleicher Steifigkeit ohne Eigengewicht

Für die Werkstoffsubstitution von Stahl durch Titan für Balken mit gleicher Steifigkeit ohne Berücksichtigung des Eigengewichts wird folgende Berechnungsformel für die Durchbiegung als Grundlage verwendet:

$$w = \frac{F \cdot a \cdot b \cdot l}{6 \cdot E \cdot I} \cdot \frac{x}{l} \cdot \left( 1 + \frac{b}{l} - \frac{x^2}{a \cdot l} \right)$$

Formel 1 - Biegelinie: Träger auf zwei Stützen



Bei der Substitution werden die angreifende Last F und die Abmessungen a, b, l und x als konstant angenommen, so dass die Durchbiegung w proportional zu dem Faktor  $\frac{1}{E \cdot I}$  ist. Für das Gleichsetzen der Durchbiegungen von Stahl und Titan ergibt sich somit folgende Substitutionsformel:

$$\frac{w_{STAHL} = w_{TITAN}}{\frac{1}{E_{STAHL} \cdot I_{STAHL}}} = \frac{1}{E_{TITAN} \cdot I_{TITAN}} \rightarrow \boxed{\frac{E_{STAHL} \cdot I_{STAHL}}{E_{TITAN} \cdot I_{TITAN}} = 1}$$

Formel 2 - Werkstoffsubstitution für Biegebalken mit gleicher Steifigkeit

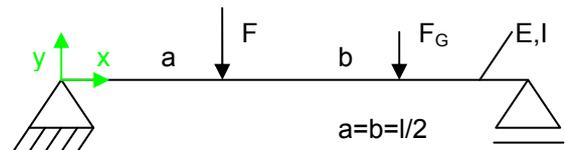
**Fazit:** Unter Beachtung des Verhältnisses der E-Module von Stahl zu Titan  $\approx 2:1$  ist somit für eine Werkstoffsubstitution bei gleicher Steifigkeit eine Vergrößerung des axiales Trägheitsmoments I um den Faktor  $\approx 2$  zu berücksichtigen.

### 7.3.2 Biegebalken mit gleicher Steifigkeit und Eigengewicht

Für die Werkstoffsubstitution von Stahl durch Titan für Balken mit gleicher Steifigkeit und Berücksichtigung des Eigengewichts wird die aus den Belastungen zusammengesetzte Durchbiegung wie folgt berechnet:

$$w = w_F + w_G$$

Formel 3 - Biegelinie für Träger auf 2 Stützen



Bei der Substitution werden die angreifende Last F und die Abmessungen  $a=b=l/2$  und x als konstant angenommen, so dass die Gesamtdurchbiegung w proportional zu dem Faktor  $\frac{F + F_G}{E \cdot I}$ . Für das Gleichsetzen der Durchbiegungen von Stahl und Titan unter Berücksichtigung des Eigengewichts ergibt sich somit folgende Substitutionsformel:

$$\frac{w_{STAHL} = w_{TITAN}}{\frac{F + F_{G-STAHL}}{E_{STAHL} \cdot I_{STAHL}}} = \frac{F + F_{G-TITAN}}{E_{TITAN} \cdot I_{TITAN}} \rightarrow \boxed{\frac{E_{STAHL} \cdot I_{STAHL}}{E_{TITAN} \cdot I_{TITAN}} \cdot \frac{F + F_{G-TITAN}}{F + F_{G-STAHL}} = 1}$$

Formel 4 - Werkstoffsubstitution für Biegebalken mit gleicher Steifigkeit

**Fazit:** Aufgrund der Summe aus angreifender Kraft  $F$  und der Gewichtskraft  $F_G$  kann hier keine Abschätzung über den Einfluss der Werkstoffsubstitution getroffen werden.

### 7.3.3 Biegebalken mit Spannungsoptimierung

Für die Spannungsoptimierung des Biegebalkens ohne Berücksichtigung des Eigengewichts wird bei der Werkstoffsubstitution folgende Berechnungsformel der Biegespannung zu Grunde gelegt:

$$\sigma_B = \frac{M_B}{W_B} \leq \sigma_{B-ZULÄSSIG} = \frac{R_{P0,2}}{S} \rightarrow M_B \leq \frac{R_{P0,2} \cdot W_B}{S}$$

Formel 5 - Biegespannung

$\sigma_B$  = Biegespannung

$M_B$  = Biegemoment

$W_B$  = axiales Widerstandsmoment

$R_{P0,2}$  = Dehngrenze

$S$  = Sicherheit

Mittels Gleichsetzen der beiden Biegemomente für Stahl und Titan ergibt sich somit folgende Verhältnisgleichung:

$$\frac{R_{e-STAHL}}{R_{e-TITAN}} \cdot \frac{W_{B-STAHL}}{W_{B-TITAN}} = \frac{R_{e-STAHL}}{R_{e-TITAN}} \cdot \frac{I_{STAHL}}{I_{TITAN}} \cdot \frac{h_{TITAN}}{h_{STAHL}} = 1$$

Formel 6 - Werkstoffsubstitution für Biegebalken mit Spannungsoptimierung

$I$  = axiales Trägheitsmoment

$h$  = Randfaserabstand

**Fazit:** Unter Berücksichtigung der Verhältnisse der Dehngrenzen von Stahl zu Titan  $\approx 1:2$  und der E-Modul-Verhältnisse von Titan zu Stahl  $\approx 1:2$  ergibt sich somit ein optimiertes Verhältnis für den Randfaserabstand von ca. 4:1 von Titan zu Stahl. Praktisch lässt sich diese Forderung jedoch kaum umsetzen, da die Wandstärken (Beispiel: Stegdicke eines IPE-Trägers) zu gering ausfallen würden. **Somit ist als Vergleichsbasis das axiale Widerstandsmoment für die Substitutionsuntersuchungen zu verwenden.**

### 7.3.4 Torsionsbelasteter Balken mit Spannungsoptimierung

Bei der Herleitung der Vergleichsformel für einen Torsionsbelasteten Balken ohne Berücksichtigung des Eigengewichts wird folgende Formel als Grundlage verwendet:

$$\tau_T = \frac{M_T}{W_P} \leq \tau_{T-ZULÄSSIG} = \frac{2}{3} \cdot \frac{R_{P0,2}}{S} \rightarrow M_T \leq \frac{2 \cdot R_{P0,2} \cdot W_P}{3 \cdot S}$$

Formel 7 - Torsionsspannung

$\tau_T$  = Torsionsspannung

$M_T$  = Torsionsmoment

$W_P$  = polares Widerstandsmoment

$R_{P0,2}$  = Dehngrenze

$S$  = Sicherheit

Durch Gleichsetzen der beiden Torsionsmomente für Stahl und Titan ergibt sich somit folgende Verhältnisgleichung:

$$\frac{R_{e-STAHL}}{R_{e-TITAN}} \cdot \frac{W_{P-STAHL}}{W_{P-TITAN}} = 1$$

Formel 8 - Werkstoffsubstitution für Torsionsbalken mit Spannungsoptimierung

### 7.3.5 Berechnungsbeispiel: Biegebalken

Im folgenden Abschnitt wird die Werkstoffsubstitution anhand eines Biegebalkens diskutiert. Eine vergleichbare Berechnung für eine Welle wurde bei der Dimensionierung der Propellerwelle durchgeführt. Folgende Skizze wurde für die Berechnung des Biegebalkens verwendet:

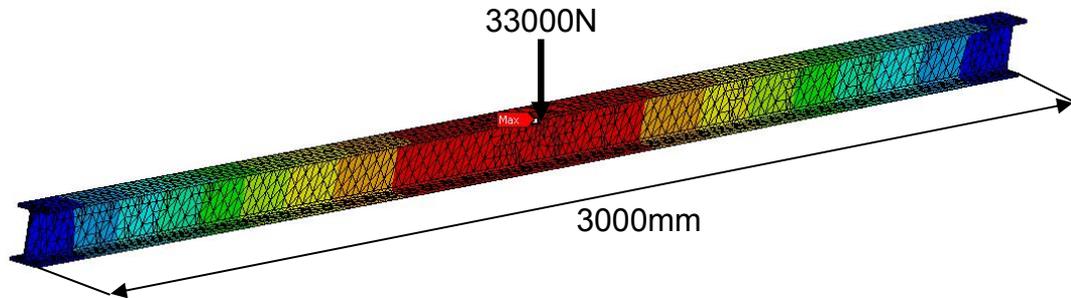


Abbildung 17 - Skizze Biegebalken

Dabei wurden analytisch mit einer mittig angeordneten Einzelkraft belastete, auf zwei Stützen gelagerte Normprofile aus Stahl, Titan und Aluminium in Anlehnung an die DIN 1025-5 miteinander verglichen, mit dem Ziel, die Durchbiegung konstant zu halten oder die Festigkeit zu optimieren. In der folgenden Tabelle sind die Dimensionierungsergebnisse aufgelistet:

Tabelle 11 - Berechnungsbeispiel Biegeträger

<b>Werkstoffdefinition</b>			
<b>Werkstoff</b>	<b>Stahl S355JR</b>	<b>Titan TiAl6V4</b>	<b>Aluminium AlMg3</b>
<b>Dehngrenze <math>R_{P0,2}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	355	828	180
<b>E-Modul <math>E</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	210000	105000	70000
<b>Dichte [g/cm<sup>3</sup>]</b>	7,9	4,5	2,7
<b>Berechnungsergebnisse unter Berücksichtigung gleicher Biegesteifigkeit</b>			
<b>erforderliches axiales Trägheitsmoment gemäß Formel 2 [mm<sup>4</sup>]</b>	13.200.000	26.400.000	39.600.000
<b>erforderliches Profil gem. DIN 1025</b>	<b>IPE180</b>	<b>IPE220</b>	<b>IPE270</b>
<b>Gewicht des Trägers [kg]</b>	55,1	43,4	35,7
<b>Biegespannung [N/mm<sup>2</sup>]</b>	175	103	61
<b>Durchbiegung [mm]</b>	6,9	6,7	4,8
<b>Gewichtseinsparung im Vergleich zur Stahlvariante [%]</b>	---	21	35

<b>Berechnungsergebnisse unter Berücksichtigung der maximalen Biegespannung (Sicherheit = 2)</b>			
<b>erforderliches axiales Widerstandsmoment gemäß Formel 6 [mm<sup>3</sup>] (Basis: Stahlwert)</b>	146.000	62.600	288.000
<b>erforderliches Profil gem. DIN 1025</b>	<b>IPE 180</b>	<b>IPE140</b>	<b>IPE240</b>
<b>vorhandene Biegespannung [N/mm<sup>2</sup>]</b>	175	330	81
<b>vorhandene Durchbiegung [mm]</b>	6,9	33,7	7,2
<b>Gewicht des Trägers [kg]</b>	55,1	21,6	30,1
<b>Gewichtseinsparung im Vergleich zur Stahlvariante [%]</b>	---	61	45

Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass durch die unterschiedlichen E-Module eine Anpassung der Querschnittsflächen zur Erzielung einer konstanten Durchbiegung notwendig ist. Je nach Berechnungsziel (steifigkeits- oder festigkeitsoptimiert) ergeben sich beim Einsatz von Titan Gewichtseinsparungen von 21 bis 61 Prozent. Ohne Berücksichtigung anderer Merkmale wie beispielsweise Festigkeit, Korrosions- und Brandbeständigkeit wäre auch Aluminium wegen des noch geringeren Gewichts für diese Anwendung geeignet.

#### **Fazit:**

Durch den Einsatz von Titan in tragenden Strukturbauteilen ist durchaus eine große Gewichtseinsparung möglich. Die Dimensionierung kann dabei anhand der aufgestellten Vergleichsformeln relativ einfach erfolgen.

### **7.4 Druckkörper**

Der Druckkörper eines Uboots ist die druckfeste Hülle zur Trennung zwischen Innen- und Außenschiff. Aufgrund des Umfangs dieser Betrachtungen ist diese Anwendung in einem gesonderten Kapitel „8 Druckkörper aus Titan“ aufgeführt.

### **7.5 Druckkörperanbindung von Komponenten**

Eine direkte Befestigung von Komponenten am Druckkörper mittels Einschrauben in die Außenhaut ist nicht erlaubt, da das entstehende Bohrloch die wirksame Wandstärke verringert, die Rissinitiierung begünstigt und somit das Versagen des Druckkörpers bewirken könnte. Deshalb müssen entweder ganze Fundamente oder

einzelne Befestigungsbolzen an die Außenhaut angeschweißt werden, an der die jeweilige Komponente befestigt werden kann.

Die bei einer Mischverbindung von Stahl mit Titan einzusetzenden Bimetall-Bolzen als Zwischenstück zwischen Druckkörper und Komponente werden mittels Sprengplattinieren hergestellt und bestehen zu je aus einer Schicht Titan und Stahl. Die Herstellung dieser Bolzen durch ein Schmelzschweißverfahren ist aufgrund der nicht vermischbaren Schmelzen der Werkstoffe nicht möglich. Nach dem Anschweißen wird der Bolzen zur Vermeidung von galvanischer Korrosion entsprechend beschichtet. Zusätzlich werden bei den Stahl-Druckkörpern diese Bolzen teilweise zur Vermeidung von Spaltkorrosion mit einer umlaufenden Kehlnaht versehen, was jedoch bei Titan-Bolzen aufgrund der hohen Spaltkorrosionsbeständigkeit nicht notwendig ist.

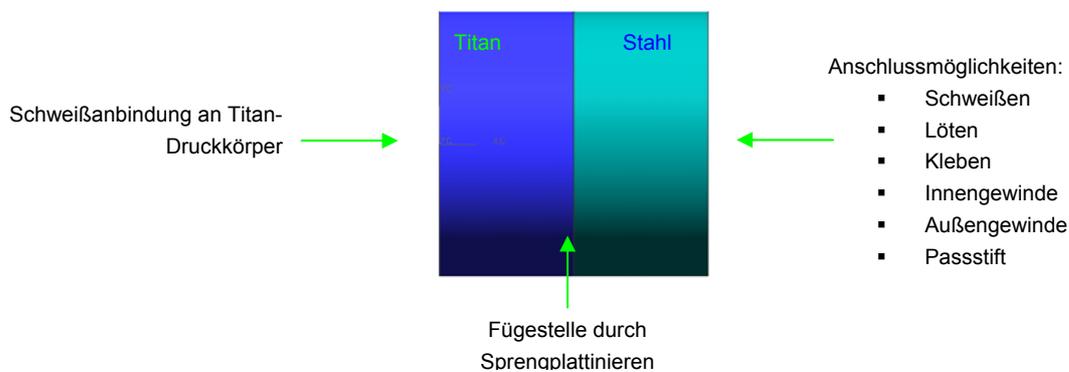


Abbildung 18 - Anschweißbolzen

Wie in der Abbildung zu sehen, ergibt sich durch diese Bimetall-Bolzen eine Vielzahl an Anbindungsmöglichkeiten für Komponenten an den Druckkörper.

### **7.6 Druckkörperdurchführungen**

Die Druckkörperdurchführungen dienen der mechanischen, hydraulischen, pneumatischen und elektrischen Kopplung zwischen dem Innen- und dem Außenschiff.

#### **7.6.1 Stand der Technik**

Zum derzeitigen Stand der Technik bestehen die Druckkörperdurchführungen aus im Druckkörper eingeschweißten Edelstahl- oder Bronzerundprofilen, die anschließend maschinell nachbearbeitet werden [N11]. In diese Profile werden Lauf- und Dichtbuchsen eingesetzt.

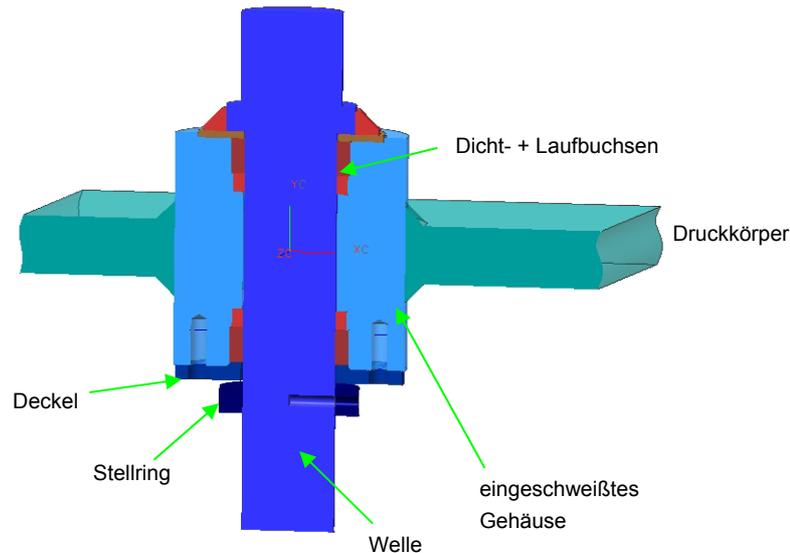


Abbildung 19 - Druckkörperdurchführung [N11]

### 7.6.1 Durchführungen durch Stahl-Druckkörper

Die Verwendung von Titandurchführungen in einem Stahldruckkörper würde wegen des enorm hohen Fertigungsaufwands beim Einschweißen (Zwischenwerkstoff erforderlich) zu deutlich erhöhten Kosten führen. Die höhere Korrosionsbeständigkeit von Titan gegenüber den herkömmlichen Edelstählen bzw. Bronzen ist durch die aufbrachte Beschichtung an dieser Stelle vernachlässigbar (Spaltkorrosionsbelastung beachten).

### 7.6.2 Durchführungen durch Titan-Druckkörper

Bei einem Titandruckkörper ist es aufgrund der Probleme beim Verbinden von Titan mit Stahl empfehlenswert, Titan für das Gehäuse (siehe Abbildung oben) zu verwenden. Insofern hohe Belastungen durch die Welle auftreten, ist der Einsatz von höherfesten Titanlegierungen wie beispielsweise TiAl6V4-ELI zu bevorzugen. Die konstruktive Ausführung kann dabei von der Stahlvariante übernommen werden, insofern die eingebrachte Laufbuchsen einen direkten Metall-Metall-Kontakt verhindern (Fressneigung).

## 7.7 Lukendeckel

Lukendeckel sind im Betrieb des Uboots die einzigen Zugänge zum Innenschiff. Die Betrachtungen dieser Komponente sind sehr umfangreich und deshalb im Kapitel „11 Teilprojekt: Lukendeckel aus Titan“ gesondert aufgeführt.

## 7.8 Ausfahrgeräte

Die Ausfahrgeräte zählen zu den wichtigsten Schnittstellen zwischen dem getauchten Uboot und seiner Umgebung. Sie dienen sowohl zur Gebietsaufklärung und Kommunikation, als auch zur Luftversorgung des Dieselmotors mittels Schnorchel. In der folgenden Abbildung sind einige Ausfahrgeräte dargestellt:



- Radar und Early-Warning-Antenne
- Optronik-Masten mit diversen Sensoriksystemen
- Sehrohre
- Antennen (UHF, VHF, HF, GPS)
- Schnorchel

Abbildung 20 - Ausfahrgeräte eines Uboots [F1]

Alle diese Ausfahrgeräte sind derzeit im Turm des Uboots angeordnet und haben aufgrund ihres Gewichts und des hohen Massenschwerpunkts einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Lage des Gesamtschwerpunkts des Uboots und somit auch auf das Verhalten im Seegang. Bei den Ausfahrgeräten zur Gebietsaufklärung wie beispielsweise dem Sehrohr ist außerdem die Dynamik des Aus- und Einfahrvorgangs entscheidend, da eine Erhöhung der Geschwindigkeiten zur Verringerung der des Entdeckungsrisikos durch optische Wahrnehmung oder Radar führt.

### 7.8.1 Vor- und Nachteile

Aus Gründen der Gewichtersparnis, Dynamik und Korrosion ist der Einsatz von Titanwerkstoffen für diese Anwendung durchaus vorstellbar und wurde in einzelnen Komponenten bereits umgesetzt. Dennoch ist auch bei den Ausfahrgeräten eine produktspezifische Abschätzung des Kosten-Nutzen-Sachverhalts notwendig. In der folgenden Auflistung werden die Vor- und Nachteile von Ausfahrgeräten aus Titan bewertet:

**Vorteile:**

- Gewichtersparnis im Vergleich zur Stahlausführung
- bessere Dynamik durch Verringerung der Masse
- kleinere Hydraulikzylinder verwendbar → Verbesserung der Hydraulikbilanz
- hohe Korrosionsbeständigkeit
- amagnetischer Werkstoff

**Nachteile:**

- eventuell höhere Material- + Fertigungskosten
- Beschichtungssysteme notwendig (wie auch bei der Stahlausführung!)

### 7.8.2 Konstruktive Anmerkungen und Werkstoffempfehlung

Bei der Dimensionierung von Ausfahrgeräten aus Titan sind folgende Aspekte unbedingt zu berücksichtigen:

1. Das geringere E-Modul der Titanwerkstoffe und die daraus resultierende Durchbiegung infolge der Anströmung, sind bei der Dimensionierung zu berücksichtigen. Die Geometrie der Ausfahrgeräte ist entsprechend anzupassen.
2. Die Gleitflächen in den Führungen sind mit einer Gleitbeschichtung zu versehen, um das Fressen des Titans in den Führungen zu vermeiden. Alternativ können auch Gleitbuchsen aufgesetzt werden.
3. Die im Wasser befindlichen Komponenten sind ebenfalls mit einer Beschichtung zur Verringerung der Signaturen (Wahrnehmung durch Optik und Radar) und zur Vermeidung von Bewuchs zu versehen.



Als Vorzugswerkstoffe für diese Anwendung sind gut kaltumformbare Titanlegierungen mit einer hohen Bruchdehnung wie beispielsweise TiAl3V2,5 und TiV15Cr3Al3Sn3 zu bevorzugen.

### 7.8.3 Berechnungsbeispiel

Dieses Berechnungsbeispiel beinhaltet eine Vergleichsrechnung zwischen einem Sehrohr aus Stahl und einem aus Titan unter Zugrundelegung folgender Anordnung:

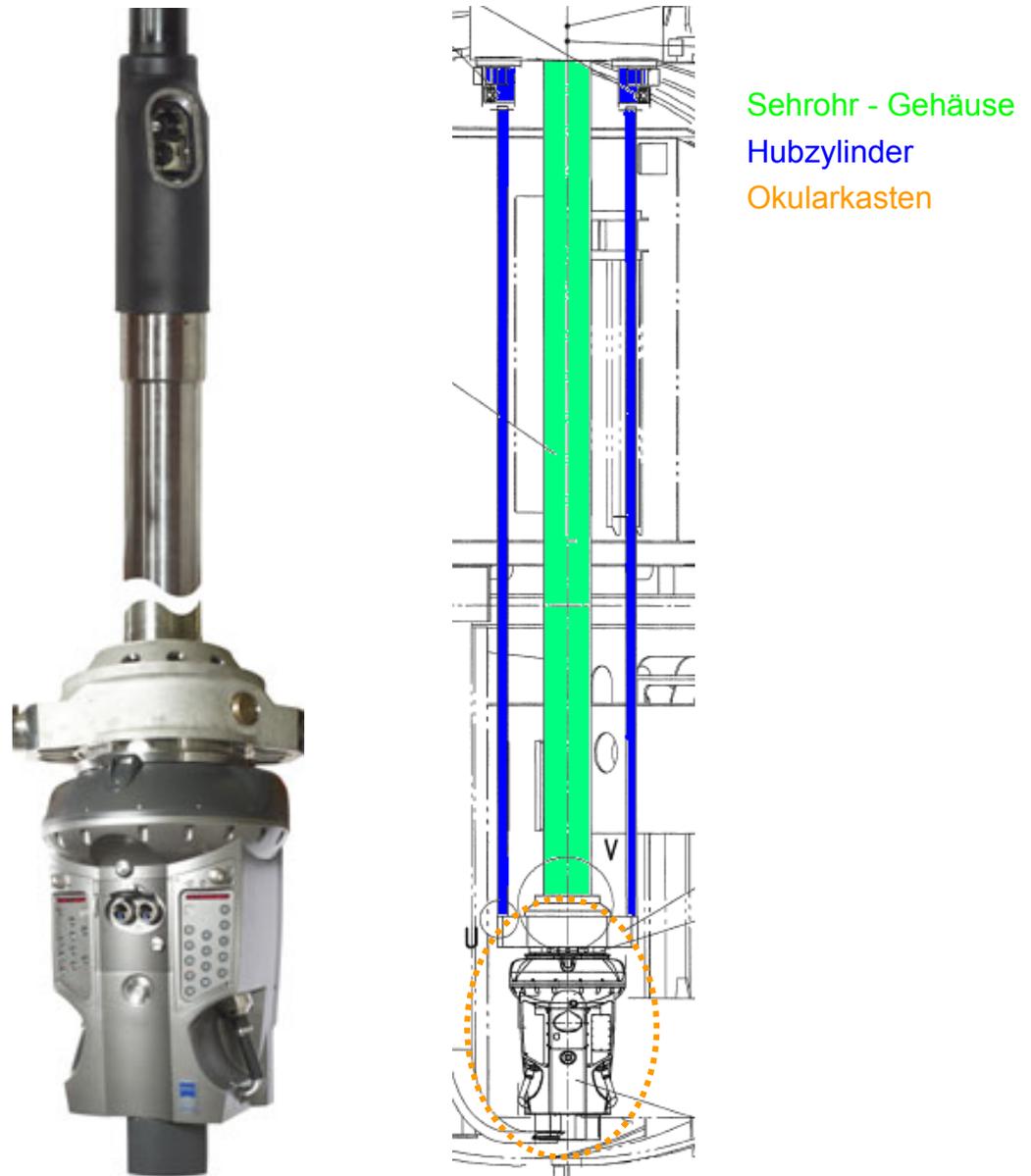


Abbildung 21 - Sehrohr: links SERO 400 [www.zeiss.de 15.01.2010], rechts Zeichnung [F1]

Dabei werden sowohl die Verformung durch Anströmung und die Geometrie als auch das Gewicht und das hydraulische Hubsystem betrachtet. Auch hier gelten die Vergleichsformeln aus Kapitel „7.3 Vorbetrachtung: Kraftübertragungs- und Stützelemente“. Für die Vereinfachung der Berechnungen wurde für die Kontur ein zylindrisches Rohr angenommen. Die Ausgangsparameter und die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle aufgelistet:

Tabelle 12 - Vergleichsrechnung Seehrohr

Werkstoff	Stahl-Seehrohr aus 1.3964	Titan-Seehrohr aus 3.7195
<b>Vorgaben</b>		
<b>E-Modul des Werkstoffs E [N/mm<sup>2</sup>]</b>	197000	105000
<b>Dichte des Werkstoffs ρ [g/cm<sup>3</sup>]</b>	7,9	4,5
<b>Gesamtlänge l [mm]</b>	10500	
<b>angeströmte Länge l<sub>1</sub> = Hub (Annahme)</b>	4500	
<b>Außendurchmesser Seehrohr D [mm]</b>	280	290
<b>Innendurchmesser Seehrohr d [mm]</b>	260	260
<b>Antrieb - Kolbendurchmesser d<sub>K</sub> [mm]</b>	120	110
<b>Antrieb - Stangendurchmesser d<sub>S</sub> [mm]</b>	50	
<b>Ausfahrzeit t [s]</b>	14	
<b>Bootsgeschwindigkeit v [kn]</b>	20	
<b>Berechnungsergebnisse</b>		
<b>Gesamtgewicht</b> $m = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) \cdot l \cdot \rho$ [kg]	704	612
<b>axiales Trägheitsmoment</b> $I = \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{64}$ [mm <sup>4</sup> ]	77400989	122868180
<b>Durchbiegung bei Anströmung</b> $w = \frac{0,85 \cdot \rho_{\text{WASSER}} \cdot v^2 \cdot D \cdot l_1^4}{16 \cdot I \cdot E}$ [mm]	0,04	0,05
<b>Eigenfrequenzen des Seehrohrs</b> $f_j = \frac{K_j}{2 \cdot \pi \cdot l_1} \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot E \cdot I}{\rho \cdot \pi \cdot (D^2 - d^2)}}$ [Hz]  Formel 9 - Eigenfrequenz Biegebalken [P7,S.159ff]  K <sub>j</sub> = Faktoren für j-Eigenfrequenz K <sub>1</sub> = 1,875104 K <sub>2</sub> = 4,694091 K <sub>3</sub> = 7,854758  Lastfall: Einspannung	f <sub>1</sub> = 32Hz f <sub>2</sub> = 79Hz f <sub>3</sub> = 133Hz	f <sub>1</sub> = 31Hz f <sub>2</sub> = 78Hz f <sub>3</sub> = 131Hz

<b>erforderliche Zugkraft der Antriebszylinder für das Ausfahren</b> $F = \frac{2 \cdot l_1 \cdot m}{t^2} \cdot \text{Beschleunigungsfaktor}_{1,5} \text{ [N]}$	94987	82663
<b>erforderlicher Hydraulikdruck für das Ausfahren</b> $p = \frac{4 \cdot F}{2 \cdot \Pi \cdot (d_K^2 - d_S^2)} / 2\text{Zylinder [bar]}$	51	55
<b>erforderlicher Ölvolumenstrom auf der Stangenseite für Ausfahren</b> $Q = \frac{\Pi}{4} \cdot (d_K^2 - d_S^2) \cdot \frac{l_1}{t} \text{ [l/min]}$	252	204
<b>Materialkosten für Rohr [€]</b>	12672	21420

Aufgrund der notwendigen Steifigkeitsoptimierung und der Durchmesserbeschränkung des Bauraums ist bei dieser Berechnung nur eine geringe Gewichtsreduzierung von ca. 13 Prozent möglich. Insofern größere Außendurchmesser für das Seerrohr erlaubt sind, ist auch eine höhere Gewichtsreduzierung gemäß den in Kapitel „7.3 Vorbetrachtung: Kraftübertragungs- und Stützelemente“ erarbeiteten Substitutionsformeln möglich. Allgemein bedeutet der Einsatz von Titan im Bereich des Seerrohrs nicht nur eine Verbesserung der Gewichtsbilanz, sondern auch eine Verringerung des auf einem Uboot meist kritischen Ölvolumenstroms für den Antrieb des Seerrohrs (20%) bzw. eine Erhöhung der Ausfahrgeschwindigkeit bei vergleichbarem Ölvolumenstrom.

## 7.9 Propeller

Die Propeller setzen die Drehbewegung der Propellerwelle in die Vortriebsbewegung des Schiffes um. Zum derzeitigen Stand der Technik sind im Handels- und Marine-schiffbau vor allem gegossene Bronzepropeller im Einsatz. Diese Werkstoffe besitzen eine hohe Dichte und die Propeller deshalb ein großes Gewicht. Der Einsatz von Leichtbauwerkstoffen zur Gewichts-, Trägheits- und Kraftstoffverbrauchsminimierung ist somit durchaus sinnvoll. Diese Substitution wurde bereits erfolgreich bei Leitschaufeln in Flugzeugtriebwerken durchgeführt, wobei entweder Titan, Faserverbundwerkstoffe oder eine Kombination beider Werkstoffe verwendet werden. Bei der Materialauswahl sind die folgenden Anforderungen zu berücksichtigen:

- geringes E-Modul zur Verbesserung der Dämpfung
- hohe Oberflächenhärte zur Verschleißminimierung durch Kavitation
- hohe Dauerschwingfestigkeit zur Lebensdauermaximierung
- hohe Festigkeit + geringe Dichte zur Gewichtsoptimierung
- hohe Bruchdehnung zur Vermeidung von Beschädigungen
- hohe Korrosionsbeständigkeit (Flächen-, Spalt- und Spannungsrisskorrosion)

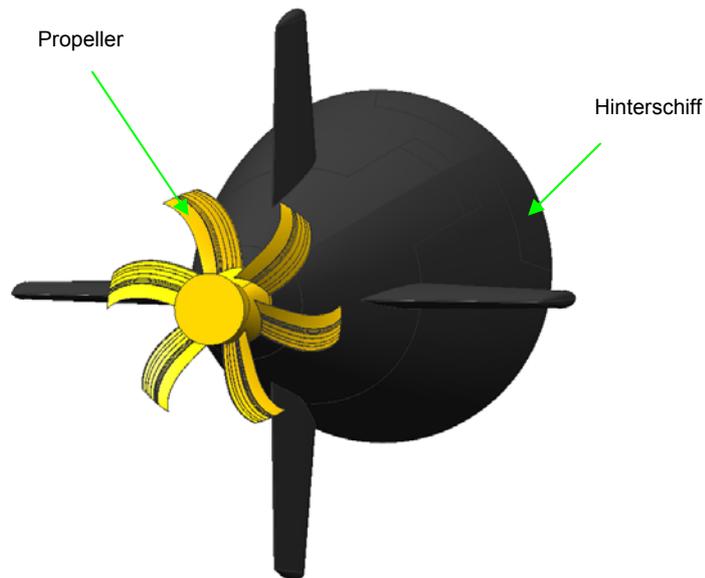


Abbildung 22 - CAD-Beispiel Propeller

Je nach Einsatzgebiet (Handels- oder Marineschiffbau) kann die Wahl des Propellerwerkstoffs aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen deutlich differenzieren. Allgemein sind jedoch folgende Vor- und Nachteile von Propellern aus Titan gültig:

**Vorteile:**

- geringes Gewicht → Einfluss auf Gewichtsbilanz
- geringe Trägheit → bessere Dynamik
- geringes E-Modul → gute Dämpfungseigenschaften
- hohe Korrosionsbeständigkeit
- gute Schadenstoleranz durch hohe Bruchdehnung
- hohe Dauerschwingfestigkeit (siehe Materialkennwerte)
- geringerer Kraftstoffverbrauch
- Reparaturmöglichkeit durch Schweißen

**Nachteile:**

- hohe Anfertigungskosten durch Vakuumgießen und aufwendige spanende Bearbeitung
- hohe Reparaturkosten durch Schutzgasschweißen

### 7.9.1 Propeller im zivilen Schiffbau

Im Zivilschiffbau werden vor allem gewichtsoptimierte und Kraftstoff sparende Propeller benötigt, die eine hohe Lebensdauer bei Maximalbelastung vorweisen, robust gegen Beschädigungen durch Treibgut sind und gegebenenfalls weltweit repariert werden können. Für diesen Einsatzzweck eignen sich besonders modular

aufgebaute Propeller mit gegossenen Titanschaufeln. Diese Schaufeln besitzen im Vergleich zu Faserverbundkonstruktionen eine hohe Schadenstoleranz, da sie relativ unempfindlich gegenüber Oberflächenschäden sind, die durch Rissausbreitung zur Zerstörung des Blatts führen können. Andererseits weisen Propeller aus Titan im Gegensatz zu den bisherigen Bronzevarianten ein deutlich geringeres Gewicht auf, was sich wiederum positiv auf die Dimensionierung von Antriebswelle, deren Lagerstellen und die Gesamtgewichtsrechnung auswirkt. Die Beschleunigungsphasen jedoch sind bei dieser Anwendung relativ gering, so dass die deutlich verringerte Rotationsträgheit nur eine untergeordnete Bedeutung besitzt. Propeller aus Titan sind somit ideal geeignet für Leichtbauanwendungen im zivilen Schiffbau.

### **7.9.2 Propeller im Marineschiffbau**

Im Bereich des Marineschiffbaus sind vor allem sehr leichte Propeller erforderlich, die eine gute Dämpfung besitzen und deshalb eine geringe Signatur aufweisen. Die Anforderungen an die Lebensdauer sind nicht so hoch wie im Handelsschiffbau, da die Einsatzzeiten und somit die Wartungsintervalle relativ kurz sind. Beim Schädigungsrisiko und somit auch bei der Materialauswahl muss jedoch deutlich zwischen dem Uboot und dem Überwasserschiff unterschieden werden.

Im Ubootbereich ist das Risiko von Schlagschäden durch großes Treibgut sehr gering und damit sind für diese Anwendung vor allem Faserverbundwerkstoffe wegen ihres geringen Gewicht und der ausgezeichneten Dämpfung zu empfehlen. Für den Überwasserbereich (Bsp. Fregatte, Korvette) hingegen sind Propeller aus Faserverbundwerkstoffen aufgrund des relativ hohen Schadensrisikos durch Treibgut nicht empfehlenswert und deshalb ist der Werkstoff Titan für Leichtbauanwendungen in diesem Bereich optimal geeignet.

### **7.9.3 Propeller in hochdynamischen Anwendungen**

Für hochdynamische Anwendungen wie beispielsweise Speedboote oder Positioniereinrichtungen für Schiffe werden Propeller mit möglichst geringer Rotationsträgheit benötigt. Der Standardwerkstoff Bronze ist aufgrund der hohen Dichte für diesen Einsatz nicht optimal. Eine Alternative bieten Titan oder Faserverbundpropeller, die je nach erforderlicher Lebensdauer ausgesucht werden. Titan wird wegen der Materialbeständigkeit für Langzeitanwendungen verwendet. Die relativ aufwendige und somit kostenintensive Anfertigung von Faserverbundpropellern wird deswegen nur für kurzzeitige Spezialanwendungen bevorzugt.

### 7.9.4 Werkstoffvergleich

In der folgenden Tabelle ist ein Werkstoffvergleich für Propellerwerkstoffe aufgelistet:

Tabelle 13 - Propellerwerkstoffe [P28, S.4], [P23, S.901ff.]

Werkstoff	G-NiAlBz1	G-MnCuAlBz	TiAl3V2,5	TiV15Cr3Al3Sn3 (annealed)	Faser- verbund
<b>Zugfestigkeit <math>R_z</math></b> [N/mm <sup>2</sup> ]	590 - 620	520 - 580	620	787	90 - 600
<b>Dehngrenze</b> $R_{p0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	245 - 290	245 - 280	483	773	---
<b>Bruchdehnung</b> $A_5$ [%]	18-25	13 - 30	15	21,5	1 - 6
<b>Dauerfestigkeit</b> [N/mm <sup>2</sup> ]	85 - 90	30 - 35	320	665-690	---
<b>E-Modul</b> [N/mm <sup>2</sup> ]	118	75 - 85	95 - 105	81 - 84	6 - 60
<b>Dichte</b> [g/cm <sup>3</sup> ]	7,6	7,1	4,5	4,7	1,4 - 1,7

Aus dieser Tabelle ist ersichtlich, dass der Alternativwerkstoff Titan in fast allen Punkten den bisherigen Bronzeworkstoffen teilweise deutlich überlegen ist. Besonders auffällig ist dies bei der Dehngrenze, Dauerfestigkeit und Dichte. Somit sind sehr hohe Gewichtseinsparungen durch sowohl Querschnittsreduzierung als auch die geringere Dichte möglich.

Bei Faserverbundwerkstoff ist besonders die geringe Bruchdehnung auffällig, was sich negativ auf die Schadenstoleranz auswirkt. Propeller aus Faserverbund sind somit sehr anfällig gegen Kollision beispielsweise mit Treibgut.

### 7.9.5 konstruktive Gestaltung

Aufgrund der Tatsache, dass die Größe und das Gewicht von Gussteilen aus Titan durch den aktuellen Stand der Gießanlagen beschränkt ist (siehe Anhang), ist eine Zusammensetzung des Propellers aus verschiedenen Einzelteilen, ähnlich dem Aufbau einer Flugzeugturbine, empfehlenswert. Die Blätter und die Nabe werden deshalb einzeln hergestellt und dann über eine Formschlussverbindung zusammengefügt. Dieses Konstruktionsprinzip bietet außerdem den Vorteil, dass bei der Instandsetzung nicht der gesamte Propeller getauscht und repariert werden muss, sondern nur einzelne Blätter auszuwechseln sind.



Abbildung 23 - Befestigung der Propellerblätter [F1]

Zur Verringerung des Risikos von leichten Schlagschäden sind, wie im Flugzeugturbinenbau, Titanstreifen an den Vorderkanten der Propellerblätter anzubringen. Zur Verschleißverringerung infolge von Kavitation sind sensible Bereiche des Propellers mit einer geeigneten Beschichtung zur Erhöhung der Oberflächenhärte zu versehen.

### 7.10 Propellerwelle

Die Propellerwelle befindet sich im Antriebsstrang eines Schiffes und stellt die Verbindung zwischen der Motor-Getriebe-Einheit und dem Propeller dar.

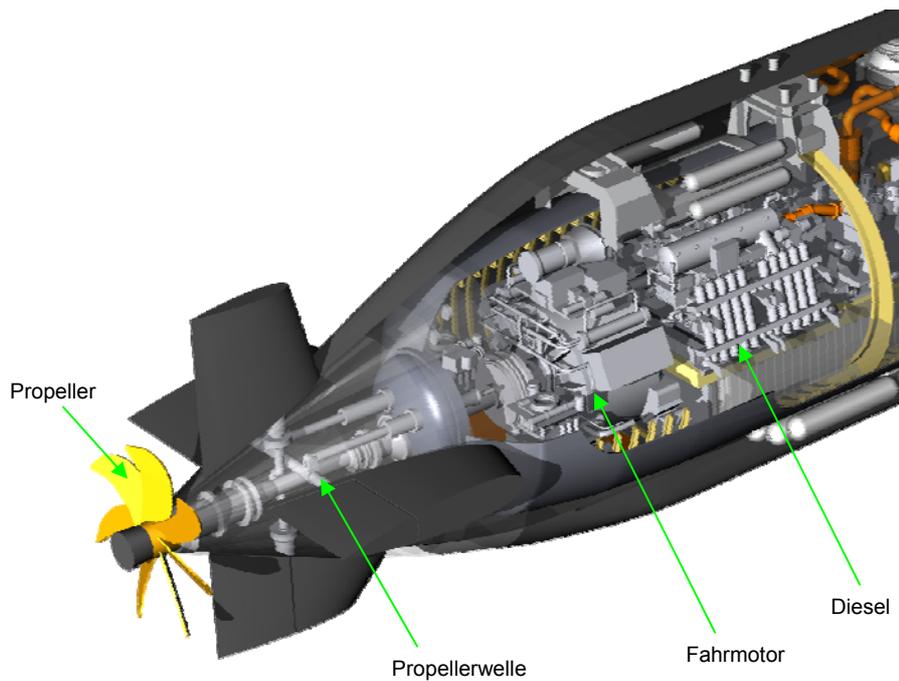


Abbildung 24 - Wellenanlage [F1]

Zum aktuellen Stand der Technik werden diese Wellen aus Vergütungsstählen gefertigt und müssen deshalb gegen Korrosion entsprechend geschützt werden.

Bei Propellerwellen aus Titan sind wegen der hohen Reibwerte von Titan-Metall-Verbindungen und der Neigung zum Fressen gesonderte Gleitbuchse für die Lagerstellen der Welle zu empfehlen. Die Vorteile sind das deutlich geringere Gewicht, die verbesserte Dämpfung und die hohe Korrosionsbeständigkeit. Als Vorzugswerkstoff ist die Standardlegierung TiAl6V4-ELI aufgrund der guten Verfügbarkeit und der hohen Festigkeiten zu empfehlen. Der Standard TiAl6V4 ist durch die auftretenden hohen Spannungen und der Empfindlichkeit gegenüber Spannungsrisskorrosion für diese Anwendung nicht geeignet.

### 7.10.1 Berechnungsbeispiel

In Bezug auf geltende Vorschriften des Germanischen Lloyd werden in diesem Berechnungsbeispiel zunächst Propellerwellen aus Stahl dimensioniert und anschließend anhand der ermittelten Substitutionsformeln in Kapitel „7.3 Vorbetrachtung: Kraftübertragungs- und Stützelemente“ eine Vergleichswelle aus Titan berechnet<sup>1</sup>. Für die Propellerwellen aus Stahl gilt folgende Formel:

$$d = F \cdot k \cdot \sqrt[3]{\frac{P}{n \cdot \left[1 - \left(\frac{d_i}{d_a}\right)^4\right]} \cdot \left(\frac{560}{R_m + 160}\right)}$$

**Formel 10 - Propellerwellendimensionierung [N10 Kap.4 S.4-2]**

F = Faktor für Antriebsart = 100 (angenommen nach [N10])

k = Faktor für Wellenart = 1,2 (angenommen nach [N10])

P = Antriebsleistung = 5000kW (angenommen)

n = 100U/min (angenommen)

$\left[1 - \left(\frac{d_i}{d_a}\right)^4\right]$  = Durchmesser Verhältnis = 1,0 (angenommen nach [N10])

R<sub>m</sub> = Zugfestigkeit des Materials

Für die Berechnung der Titanwelle wurde folgende Formel verwendet:

$$\frac{R_{e-STAHL}}{R_{e-TITAN}} \cdot \frac{W_{P-STAHL}}{W_{P-TITAN}} = 1 \quad (\text{Formel 8})$$

für Kreisquerschnitt

$$\frac{R_{e-STAHL}}{R_{e-TITAN}} \cdot \frac{d_{STAHL}^3}{d_{TITAN}^3} = 1$$

<sup>1</sup> Anmerkung: Für Wellen aus Titan ist die Verwendung des Werkstofffaktors gemäß GL nicht zulässig.

In der folgenden Tabelle sind alle Berechnungsergebnisse dargestellt:

Tabelle 14 - Vergleichsrechnung Propellerwelle

<b>Werkstoff</b>	<b>42CrMo4</b>	<b>X2CrNiMnMoNb 21 16 5 3 (1.3964)</b>	<b>TiAl6V4 ELI</b>
<b>Dichte <math>\rho</math> [g/cm<sup>3</sup>]</b>	7,8	7,9	4,4
<b>Elastizitätsmodul <math>E</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	210000	197000	105000
<b>Dehngrenze <math>R_{p0,2}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	650	430	828
<b>Zugfestigkeit <math>R_m</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	1100	850	900
<b>Wellenlänge <math>l</math> [mm]</b>	10000	10000	10000
<b>Wellendurchmesser <math>d</math>, gemäß GL-Gleichung bzw. Substitution [mm]</b>	340	365	315

Für die Werkstoffsubstitution bei einer Propellerwelle ist unbedingt die Eigenfrequenz konstant zu halten um die Signaturen nicht zu verschieben. Für die Werkstoffsubstitution wird deshalb auch der Wellendurchmesser gemäß Formel 4 überprüft, wobei die Kraft  $F = 0$  gesetzt wird:

$$\frac{E_{STAHL}}{E_{TITAN}} \cdot \frac{I_{STAHL}}{I_{TITAN}} \cdot \frac{F + F_{G-TITAN}}{F + F_{G-STAHL}} = 1 \quad \text{Formel 4}$$

Nach dem Anpassen der Formel an einen Kreisquerschnitt ergibt sich folgende Vergleichsformel für die Durchbiegung der Propellerwelle:

$$\frac{E_{STAHL}}{E_{TITAN}} \cdot \left( \frac{d_{STAHL}}{d_{TITAN}} \right)^2 \cdot \frac{\rho_{TITAN}}{\rho_{STAHL}} = 1 \quad \rho = \text{Dichte}$$

Formel 11 - Vergleichsformel Propellerwelle

Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle aufgelistet:

<p><b>Wellendurchmesser bei gleicher Durchbiegung</b></p> $d_2 = \sqrt{\frac{\rho_2 \cdot E_{42CrMo4}}{\rho_{42CrMo4} \cdot E_2}} \cdot d_{42CrMo4} \text{ [mm]}$ <p>Anmerkung: Der Index 2 steht hier sowohl für beide Alternativwerkstoffe 1.3964 und TiAl6V4-ELI</p>	340	355	365
<p><b>eingesetzter Wellendurchmesser</b>  <math>d = \text{MAX}[d_1; d_2] \text{ [mm]}</math></p>	340	365	365
<p><b>Gesamtgewicht</b></p> $m = \frac{\Pi}{4} \cdot d^2 \cdot l \cdot \rho \text{ [kg]}$	7080	8270	4600
<p><b>Überprüfung der Durchbiegung f einer 2-fach gelagerten Welle</b></p> $f = \frac{5 \cdot m \cdot g \cdot l^3}{384 \cdot E \cdot I} = \frac{5 \cdot m \cdot g \cdot l^3}{6 \cdot E \cdot \Pi \cdot d^4} \text{ [mm]}$ <p>Formel 12 - Wellendurchbiegung [P12 S.44]</p>	6,6	6,2	6,4
<p><b>Massenträgheitsmoment</b></p> $J = \frac{m}{8} \cdot d^2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}$	102	138	77
<p><b>erste kritische Drehzahl</b></p> $n = \frac{1}{2 \cdot \Pi} \cdot \sqrt{\frac{g}{f}} \text{ [U/min]}$ <p>Formel 13 - kritische Drehzahl</p>	368	380	374
<p><b>Werkstoffkosten</b> [€]</p>	35400	140590	161000

Anhand dieser Beispielrechnung ist ersichtlich, dass der Einsatz von Titan wegen der geringen Dichte deutliche Vorteile in den Punkten Gesamtgewicht und Massenträgheitsmoment besitzt. Dadurch werden die Festigkeitsberechnung (Betrieb + Schock) und die Dynamik des Antriebstrangs deutlich verbessert. Die Durchbiegung durch das Eigengewicht wurde bei der Beispielrechnung konstant gehalten und bewirkt somit kaum einen Unterschied in der kritischen Drehzahl der Welle. Unter Berücksichtigung der Werkstoffkosten liegt die Titanwelle im Bereich der Edelstahlwellen, wie sie vor allem für amagnetische Uboote eingesetzt werden.

### 7.10.2 Fazit

Aufgrund der deutlichen Gewichtseinsparungen eignen sich Propellerwellen aus Titan besonders für gewichtskritische (Uboot) und/oder hochdynamische Anwendungen. Für den Einsatz von Titan im militärischen Bereich ist durch die Werkstoffsubstitution eine **Reduzierung der Schocklasten im Bereich von mehreren Mega-Newton möglich**. Weiterhin ergibt sich unter Berücksichtigung der deutlich verringerten Massenträgheitsmomente bei gleicher Antriebsleistung eine günstigere Dynamik

des Antriebsstrangs. Aus wirtschaftlicher Sicht ist die Titanvariante durchaus konkurrenzfähig zu den amagnetischen Wellen aus hochlegiertem Edelstahl, während der Einsatz von Titanwellen im Handelsschiffbau statt den üblichen Vergütungsstahl aufgrund der deutlich erhöhten Materialkosten als unwirtschaftlich zu bewerten ist. Ein weiterer wichtiger Entscheidungspunkt sind die derzeit verfügbaren maximalen Gewichte der Gussblöcke von bis zu 12t, die keine schwereren einteiligen Wellen ermöglichen.

### 7.11 Ruderanlage

Die Ruderanlage ist das Steuerorgan des Schiffes und dient zur Einstellung des Kurses und der Tiefensteuerung. Der Einsatzzweck und die damit verbundenen Anforderungen an Ansprechverhalten, Drehkreisdurchmesser und Fahrwiderstand bestimmen die Größe und das Gewicht der Ruder und demzufolge auch des Antriebs (Rudermaschine), der Lagerung und der Kraftübertragung.

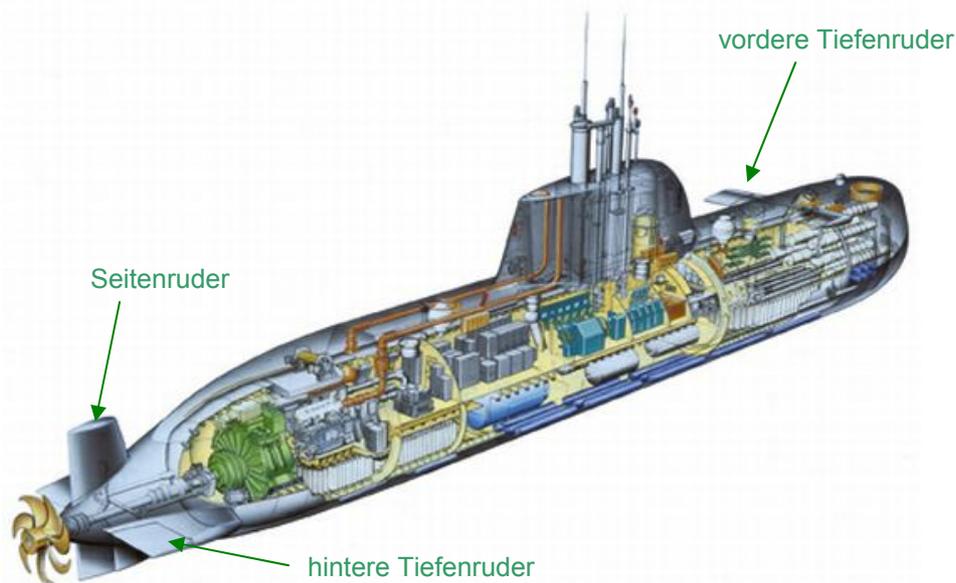


Abbildung 25 - Ruderanordnung Uboot KI.214 [F1]

Das gesamte Rudersystem besteht aus den Komponenten Rudermaschine, Ruderschaft, Lagerung und Ruder. Die folgende Betrachtung konzentriert sich auf die Komponenten Ruder und Ruderschaft, da ein Einsatz von Titan bei diesen Teilsystemen die größten Gewichtseinsparungen mit sich bringt.

#### 7.11.1 Ruder

Die Ruder dienen der Strömungsbeeinflussung und damit zur Kurseinstellung des Schiffes. Sie befinden sich vollständig im Seewasser und sind durch das Rudergestände mit dem Antrieb und der Lagerung verbunden.

In der folgenden Tabelle werden die Vor- und Nachteile von Rudern unterschiedlicher Werkstoffe miteinander verglichen:

Tabelle 15 - Vergleich Ruderwerkstoffe

<b>Merkmal</b>	<b>Stahl-Variante</b>	<b>Titan-Variante</b>	<b>Faserverbund-Variante</b>
<b>Gewicht</b>	hoch	mittel	<b>gering</b>
<b>Trägheit</b>	hoch	mittel	<b>gering</b>
<b>Verschleiß</b>	<b>gering</b>	mittel	hoch
<b>Korrosionsanfälligkeit</b>	hoch	<b>gering</b>	<b>gering</b>
<b>Fertigungsaufwand</b>	<b>gering</b>	mittel	hoch
<b>Fertigungskosten</b>	<b>gering</b>	hoch	hoch
<b>Wartungsaufwand</b>	<b>gering</b>	<b>gering</b>	hoch
<b>Schadensempfindlichkeit</b>	<b>gering</b>	<b>gering</b>	hoch
<b>Schockbeanspruchung</b>	hoch	mittel	<b>gering</b>
<b>Reparaturfreundlichkeit</b>	<b>hoch</b>	mittel	gering

Aufgrund der Tatsache, dass es sich bei den Rudern um ein System mit relativ geringer Dynamik handelt, ist der Einfluss der Gewichtseinsparung in Bezug auf die Trägheit durch die Substitution mit Titan eher gering. Außerdem sind die Gewichtsvorteile von Faserverbund-Rudern größer als die von Titan, so dass für Schiffe mit geringem Schadensrisiko (Bsp. Uboote) dieser Werkstoff zu empfehlen ist. Ruder aus Titan sind somit nur für gewichtskritische Überwasserschiffe geeignet, deren Fahrbetrieb ein relativ hohes Schadensrisiko für die Ruder aufweisen und einer eventuellen Schockbelastung unterliegen. Als Titan-Vorzugswerkstoff ist die Legierung TiAl3V2,5 zu empfehlen, da diese eine gute Verfügbarkeit, ausgezeichnete Kaltumformbarkeit und aufgrund der hohen Bruchdehnung eine hohe Schadenstoleranz aufweist.

### 7.11.2 Berechnungsbeispiel Ruder

Die Größe der Ruder und demzufolge auch die möglichen Gewichtseinsparungen sind abhängig vom Einsatzzweck. So reicht die Spanne der Rudermasse von einigen Kilogramm für Kleinboote bis zu mehreren Tonnen für Großcontainerschiffe.

Als Beispiel für ein durchflutetes Stahl-Ruderblatt wird eine Gesamtmasse von 1700kg angenommen. Ersetzt man den Werkstoff Stahl durch Titan, so ergibt sich ein theoretisches Gewicht von ca. 980kg und somit eine Einsparung von ca. 720kg. Verwendet man diesen Werkstoff für die hinteren Tiefen- und Seitenruder eines Uboots, so ergibt sich eine Gesamteinsparung von ca. 2900kg und somit eine Schockkraftreduzierung im Ansprengefall von mehreren Mega-Tonnen. Allerdings sind

auch die erhöhten Materialkosten von ca. 34000€ gegenüber der Stahl-Variante von ca. 7000€ zu berücksichtigen.

### 7.11.3 Ruderschaft

Der Ruderschaft ist die Verbindung zwischen Ruderantrieb, Lagerung und Ruderblatt.

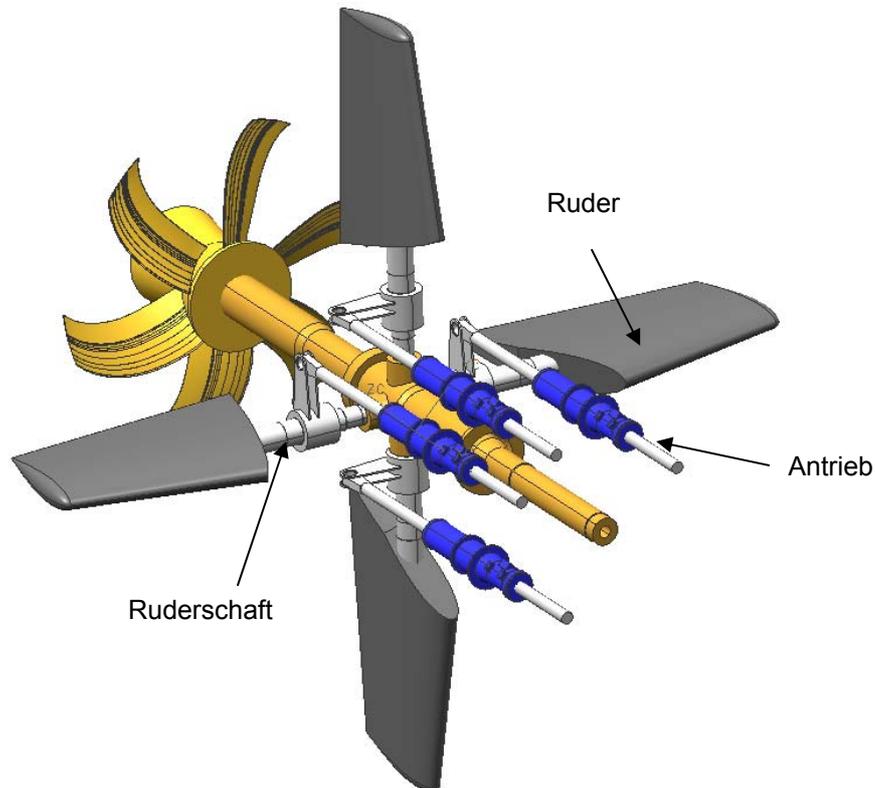


Abbildung 26 - CAD-Beispiel Ruderanlage

Aufgrund der großen Bauteilabmessungen und des hohen zu übertragenden Drehmoments weisen die derzeitigen Ruderschäfte aus Stahl ein hohes Gewicht auf. Besonders im Militärschiffbau ist dies durch die erforderliche Schockbeständigkeit (Beschleunigungen von mehreren 100g) von Nachteil, da die Lagerungen sehr massiv zu dimensionieren sind. Eine Gewichtsreduzierung bewirkt eine Verkleinerung der Lagerung und somit eine Verbesserung der Bauraumausnutzung und Erleichterung der Montage. Als Vorzugswerkstoff für diese Anwendung ist die Legierung TiAl6V4-ELI wegen der hohen Festigkeiten, guten Verfügbarkeit und guten Spannungsrisskorrosionsbeständigkeit zu empfehlen. Im eingebauten Zustand ist außerdem eine Beschichtung zur Vermeidung von Bewuchs notwendig.

### 7.11.4 Berechnungsbeispiel Ruderschaft

In diesem Berechnungsbeispiel wird auf Basis eines fiktiven Vollscheiberuderschaftes aus X4CrNi 13 4 (1.4313) eine mögliche Substitution durch einen Titanschaft aus TiAl6V4-ELI bzw. einen amagnetischen Edelstahlschaft aus 1.3964 analytisch geprüft. Die Grundlage dafür bildet folgende Geometrie:

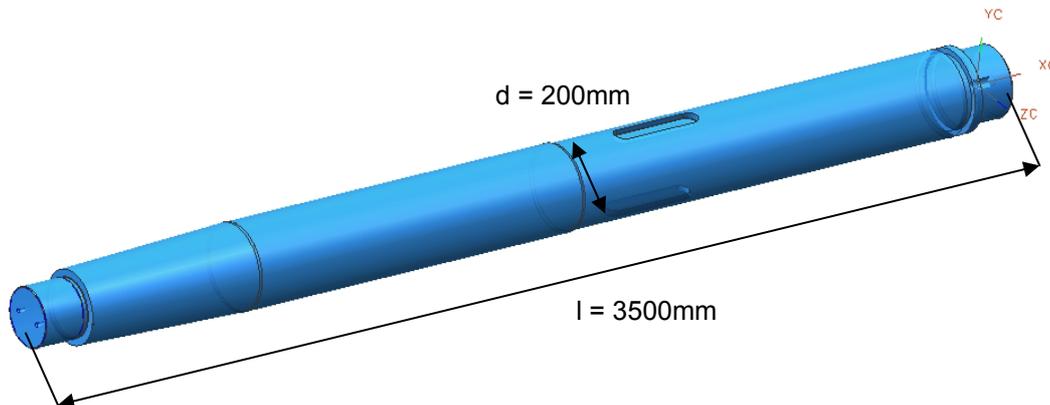


Abbildung 27 - Ruderschaft-Geometrie

Gemäß den Vorschriften des Germanischen Lloyd [N10 Kap.2 S.14-2ff.] ist der Stahlruderschaftdurchmesser eines Vollscheiberuders gemäß folgender Formel auszulegen:

$$D_i = 4,2 \cdot \sqrt[3]{Q_R \cdot k_R} = 4,2 \cdot \sqrt[3]{Q_R \cdot \left(\frac{235}{R_{p0,2}}\right)^{0,75}}$$

**Formel 14 - Ruderschaftdurchmesser bei Torsionsbelastung [N10 Kap.2, S.14-4]**

$R_{p0,2}$  = Dehngrenze

$k_R$  = Werkstofffaktor

$Q_R$  = resultierendes Torsionsmoment = 150Nm

Für die Werkstoffsubstitution mit Titan ist wieder folgende Formel gemäß Kapitel „7.3 Vorbetrachtung: Kraftübertragungs- und Stützelemente“ einzusetzen:

$$\frac{R_{e-STAHL}}{R_{e-TITAN}} \cdot \frac{W_{P-STAHL}}{W_{P-TITAN}} = 1 \quad (\text{Formel 8})$$

Angewendet auf einen Kreisquerschnitt ergibt sich folgende Berechnungsvorschrift:

$$\frac{R_{e-STAHL}}{R_{e-TITAN}} \cdot \frac{d_{STAHL}^3}{d_{TITAN}^3} = 1$$

**Formel 15 - Vergleichsformel Ruderschaft**

Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle aufgeführt:

Tabelle 16 - Vergleichsrechnung Ruderschaft

Werkstoff	X4CrNi 13 4 (1.4313)	X2CrNiMnMoNb 21 16 5 3 (1.3964)	TiAl6V4-ELI
Dehngrenze $R_{P0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	520	430	828
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	7,8	7,9	4,4
Durchmesser $D_t$ gemäß GL-Gleichung bzw. Vergleichsformel [mm]	185	195	160
Gewicht $m = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot l \cdot \rho$ [kg]	<b>734</b>	<b>826</b>	<b>310</b>
Massenträgheitsmoment $J = \frac{m}{8} \cdot D^2$ [kg·m <sup>2</sup> ]	<b>3,1</b>	<b>3,9</b>	<b>1,0</b>
Materialkosten [€]	<b>5872</b> (8€/kg)	<b>14868</b> (18€/kg)	<b>10850</b> (35€/kg)

Aus dieser Vergleichstabelle ist ersichtlich, dass aufgrund der Werkstoffsubstitution bei gleichem Drehmoment eine Gewichtseinsparung von **57 bis 62 Prozent** möglich ist. Bei der Heckruderanlage eines Uboots (Seiten- + Tiefenruder) kann somit aufgrund der Integration von 4 Ruderschäften eine deutliche Gewichtsreduzierung werden.

### 7.11.5 Fazit

Durch den Einsatz von Titan im Bereich der Ruderschäfte sind enorme Gewichtseinsparungen möglich, was bei militärischen Anwendungen eine **Reduzierung der Schocklasten von mehreren Mega-Newton** bedeutet. Einen weiteren Vorteil bietet die hohe Korrosionsbeständigkeit der Titan-Ausführung gegenüber der bisherigen Schaftvariante aus Edelstahl. Im Vergleich zu Ruderschäften aus 1.3964 sind theoretisch ohne Berücksichtigung der Fertigungskosten sogar Einsparungen bei den Werkstoffkosten möglich.

## 7.12 Ankeranlage

Die Ankereinrichtung dient zur Positionssicherung des Schiffes bei ausgeschaltetem Antrieb. Sie besteht aus folgenden Hauptkomponenten:

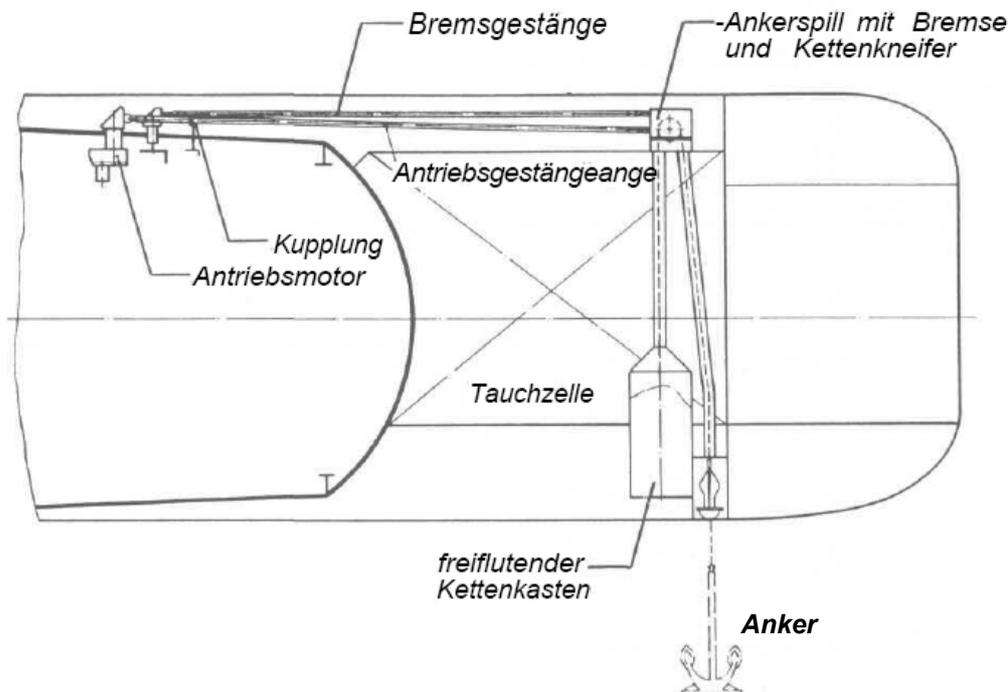


Abbildung 28 - Ankereinrichtung mit innen liegendem Antrieb [P32, S. 98]

Neue Ankeranlagen auf Ubooten tendieren zu außen angeordneten Antrieben, so dass das Gesamtsystem kompakter gestaltet und die Anzahl der Druckkörperdurchführungen reduziert werden kann.

Der Einsatz von Ankersystemen auf einem Uboot stellt folgende Anforderungen an diese Komponente:

- Dimensionierung nach den Vorschriften des Germanischen Lloyd
- Einsatz eines Ankers mit hoher Haltekraft im Vergleich zum Ankergewicht → Gewichtsreduzierung
- Anordnung des Ankers mittschiffs im Bereich der Torpedoröhre → Buganker
- strömungsgünstige Integration des Ankers in der Schiffstruktur
- Verwendung einer Haltevorrichtung an der Ankerwinde (Bremse)
- Verwendung einer Notkappvorrichtung

### 7.12.1 Auswahl Ankertyp und Werkstoff

Die Haltekraft eines Ankers ist direkt abhängig von dessen Gewicht. Ein herkömmlicher Anker aus Stahl ist somit wirtschaftlich nicht ohne konstruktive Änderungen durch einen Titananker ersetzbar. Dazu müsste der herkömmliche Patentanker wegen der geringeren Dichte entweder vergrößert werden, was im Allgemeinen ein

Platzproblem darstellt, oder durch ein anderes Konstruktionsprinzip ersetzt werden. Eine wirksame Alternative bietet hierbei die Einführung eines Leichtankers mit hoher Haltekraft wie beispielsweise des Danforth-Ankers, welcher eine deutlich gesteigerte Haltekraft im Vergleich zum Patentanker besitzt.

Tabelle 17- spezifische Haltekraft verschiedener Ankertypen in N/kg [P32,S.152]

Kettenzugwinkel	0°		10°		30°	
	Sand	Schlick	Sand	Schlick	Sand	Schlick
<b>Meeresboden</b>	Sand	Schlick	Sand	Schlick	Sand	Schlick
<b>Stockanker</b>	80	---	62	---	---	---
<b>Patentanker (System Hall)</b>	40	20	32	14	21	14
<b>Danforth-Anker (Normalausführung)</b>	420	608	307	435	185	260
<b>Pilzanker</b>	30	---	23	19	15	20

Durch die Verwendung des Danforth-Ankers kann somit die Gesamtmasse reduziert und der Einsatz von Titan als Ankerwerkstoff ermöglicht werden.



Abbildung 29 - links: Patentanker [www.toplicht.de, 15.01.2010]

Abbildung 30 - rechts: Danforth-Anker [www.nanaimomarinecentre.com, 15.01.2010]

Ein weiterer Vorteil ist die deutlich höhere Korrosionsbeständigkeit und die damit verbundene Optimierung der Funktionsbeständigkeit und Optik, die vor allem für repräsentative Schiffe wie beispielsweise Yachten und Kreuzfahrtschiffe wichtig ist.

Als Vorzugswerkstoff ist die Legierung TiAl3V2,5 wegen der guten Verfügbarkeit, der ausgezeichneten Kaltumformbarkeit und den mittleren Festigkeiten zu empfehlen.

Aus der Werkstoffsubstitution mit Titan ergeben sich folgende Vor- und Nachteile:

**Vorteile:**

- deutlich erhöhte Korrosionsbeständigkeit
- verbesserte Optik (Bsp. Yachten)
- geringeres Gewicht
- amagnetischer Werkstoff

**Nachteile:**

- größer als Stahl-Anker des gleichen Ankertyps → Leichtankerbauweise notwendig
- höhere Kosten

### 7.12.2 Berechnungsbeispiel

In diesem Berechnungsbeispiel soll ein Patent-Anker mit einem Danforth-Anker inklusive deren Stegketten gemäß [N13] und [N14] für die folgenden Anforderungen verglichen werden:

- Strömungsgeschwindigkeit  $v_S = 5 \text{ kn}$
- Meeresboden = Sand
- Ankertiefe = 50m → Kettenlänge  $L = 200 \text{ m}$  [N13]
- erforderliche Haltekraft  $F = 20 \text{ kN}$
- Hievgeschwindigkeit  $v_H = 10 \text{ m/min}$
- Kettenzugwinkel  $\alpha = 0^\circ$

Nach der Tabelle [P32, S.105] für die Haltekraft in Abhängigkeit vom Kettenzugwinkel und Meeresboden ergeben sich für den Patentanker eine spezifische Haltekraft von 40 N/kg Ankermasse und für den Danforth-Anker 420N/kg. Die Haltekraft für den Danforth-Anker ist somit um den Faktor 10 höher als die des gebräuchlichen Patentankers.

Tabelle 18 - Vergleichsrechnung Anker

	Patentanker	Danforth-Anker	Danforth-Anker
<b>Werkstoff</b>	St 35 Gütegrad K2	St 35 Gütegrad K2	TiAl3V2,5
<b>Zugfestigkeit <math>R_m</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	490 [N13]	490 [N13]	620
<b>Dichte <math>\rho</math> [g/cm<sup>3</sup>]</b>	7,8	7,8	4,5
<b>Dimensionierung des Ankers</b>			
<b>spezifische Haltekraft <math>F_s</math> aus Tab. [P32, S. 105] [N/kg]</b>	40	420	420
<b>erforderliche Ankermasse</b> $m_A = \frac{F}{F_s}$ [kg]	500	50	50
<b>eingesetzte Ankermasse [N10, Kap. 1 S.18-7] [kg]</b>	500	375 (Mindestgewicht für Leichtanker = 75% des Patentanker [ N13])	375 (Mindestgewicht für Leichtanker = 75% des Patentanker [ N13])
<b>Materialkosten [€]</b>	1500	1125	13125
<b>Dimensionierung der Ankerkette</b>			
<b>erforderlicher Drahtdurchmesser in Abhängigkeit von der Ankermasse [N10, Kap. 1 S.18-7] [mm]</b>	20,5	20,5	20,5
<b>Kettenteilung [N14, S.4] [mm]</b>	82	82	82
<b>erforderliche Kettengliedanzahl</b>	2440	2440	2440
<b>Kettengliedbreite [N14, S.4] [mm]</b>	74	74	74
<b>Kettengliedlänge [N14, S.4] [mm]</b>	123	123	123
<b>Gewicht eines Kettenglieds [kg]</b> $m_G = \rho \cdot \frac{\Pi}{4} \cdot d^2 \cdot \left( \frac{2 \cdot t - 2 \cdot w + 4 \cdot d}{\Pi \cdot w - \Pi \cdot d} \right)$	0,68	0,68	0,4
<b>Gewicht der Ankerkette</b> $m_K = n \cdot m_G$ [kg]	1660	1660	976
<b>Materialkosten [€]</b>	4980	4980	34160
<b>Gesamtgewicht Anker + Kette</b>			
<b>Gesamtgewicht Anker + Kette</b>	3160kg	2035kg	1351kg
<b>Materialkosten Anker + Kette</b>	9480€	6105€	47285€

### 7.12.3 Fazit

Aus der Vergleichsrechnung ist ersichtlich, dass nur durch den Einsatz eines anderen Ankerprinzips das Gewicht eines Ankers verringert werden kann und somit kein werkstoffbezogener Einfluss der Dichte existiert. Der Einsatz von Titan als Ankermaterial sowohl im militärischen als auch im zivilen Schiffbau ist deshalb als technisch unwirksam und unwirtschaftlich zu bewerten.

### 7.13 Außendruckfeste Transportbehälter

Auf Ubooten können außendruckfeste Container missionsbezogen für den Transport von Militärmaterial, beispielsweise für Spezialkräfte, auf dem Oberdeck des Hinterschiffs montiert werden.

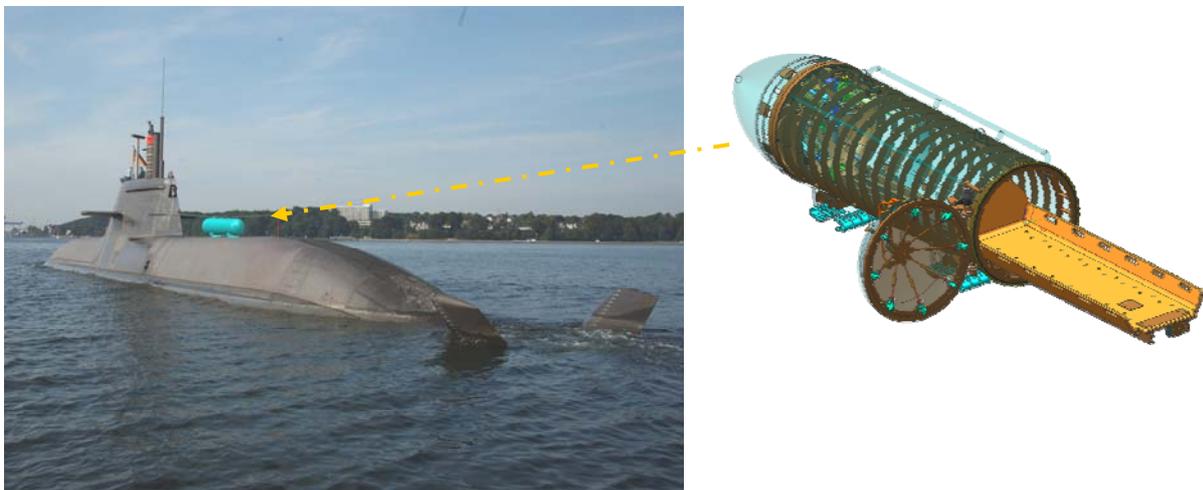
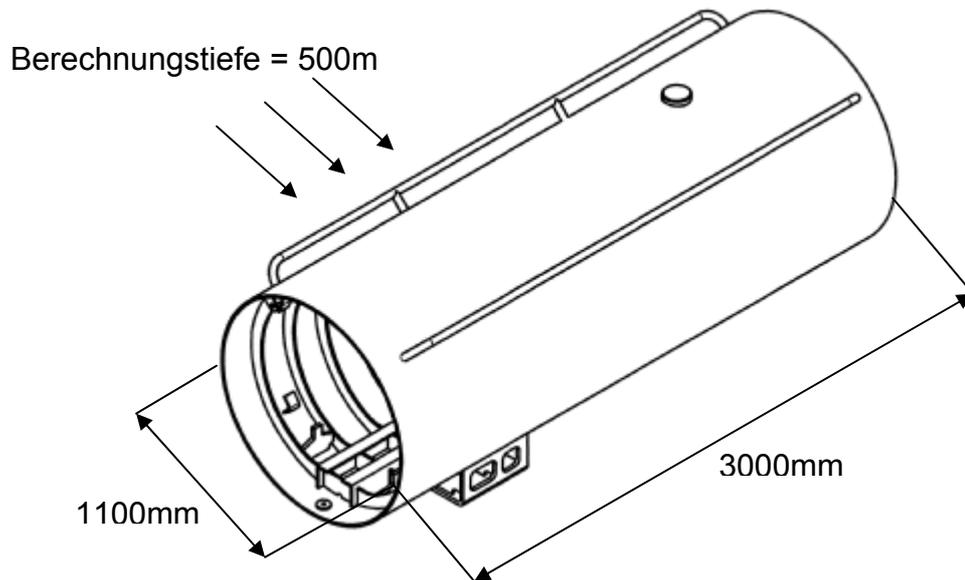


Abbildung 31 - außendruckfeste Container [F1]

Diese Container werden vorwiegend aus Stahl gefertigt und besitzen wegen ihres Stauvolumens und der daraus resultierenden Baugröße mit den entsprechenden Wandstärken ein Gewicht von ca. 2000 bis 5000kg (ohne Inhalt). Aufgrund der Schockanforderungen ist das Gewicht dieser Anbaukomponenten entscheidend für die konstruktive Ausführung der Lagerung im Oberdeck und somit der Einsatz eines Leichtbauwerkstoffs durchaus sinnvoll. Da es sich bei diesen Komponenten um druckfeste Behälter handelt, gilt die gleiche Werkstoffempfehlung wie für den Druckkörper (siehe Kapitel „8 Druckkörper aus Titan“) selbst. Allerdings sind bei dieser Anwendung die Einschnürung in Folge des Tauchdrucks und demnach auch das E-Modul nicht so entscheidend beim Einsatz von Titan wie sie es beispielsweise beim Druckkörper ist.

**Berechnungsbeispiel:**

Für das Berechnungsbeispiel wurde ein Druckfester Staubehälter mit folgenden Abmessungen verwendet:



Die Berechnung der verschiedenen Druckkörpervarianten erfolgte gemäß den Richtlinien des Germanischen Lloyds [N10]. Folgende Ergebnisse wurden dabei erzielt:

Tabelle 19 - Berechnungsbeispiel Staubehälter

Merkmale	Druckkörper 15NiCrMo10-6 (HY80, 1.6780)	Druckkörper X2CrNiMnMoNb 21 16 5 3 (1.3964)	Druckkörper TiAl3V2,5 (3.7195)
<b>Vorgaben</b>			
<b>Nenntauchtiefe [m]</b>	500		
<b>Druckkörper- außendurchmesser [mm]</b>	1100		
<b>Druckkörperlänge [mm]</b>	3000		
<b>Außenhautstärke [mm]</b>	10	10	11
<b>Spantabstand [mm]</b>	170	170	150
<b>Steghöhe [mm]</b>	10	9	5
<b>Stegbreite [mm]</b>	22	21	30
<b>Gurthöhe [mm]</b>	10	10	14
<b>Gurtbreite [mm]</b>	22	21	30
<b>Querkontraktionszahl <math>\nu</math></b>	0,3	0,3	0,3
<b>Elastizitätsmodul [N/mm<sup>2</sup>]</b>	200000	198000	105000
<b>Berechnungen</b>			
<b>maximal auftretende Spannung bei Nenn- tauchtiefe [N/mm<sup>2</sup>]</b>	252	247	210
<b>maximale Verformung des Druckkörpers [m]</b>	0,6	0,6	0,8
<b>kritische Tiefe für symmetrisches Beulen [m]</b>	9409	6346	3982
<b>kritische Tiefe für asymmetrisches Beulen [m]</b>	1215	1639	1346
<b>Gewicht Außenhaut [kg]</b>	812	990	508
<b>Gewicht Spant [kg]</b>	11,0	10,5	8,5
<b>Spantenzahl</b>	13	17	20
<b>Gesamtgewicht Druckkörperabschnitt [kg]</b>	955	990	679
<b>Gewicht im Vergleich zur HY80-Variante [%]</b>	100	104	71

**Fazit:**

Obwohl diese Berechnungen nur teilweise Fertigungstoleranzen oder Materialunregelmäßigkeiten des Zylinders berücksichtigen, die Endböden und andere Belastungen außer der Tauchdruck nicht betrachtet werden und die Ergebnisse somit nicht direkt in die Praxis übertragen werden können, ist dennoch das große Potential beim Einsatz von Titanwerkstoffen in dieser Komponente erkennbar. In der Beispielberechnung konnte das Gesamtgewicht bei gleich bleibendem Umgebungsdruck im Vergleich zu den Stahlvarianten um 29 bzw. 31 Prozent gesenkt werden.

### 7.14 Windensysteme

Die Windensysteme im Oberdeck dienen zum Ausbringen und Einholen von verschiedenen Systemen wie beispielsweise Schleppsonare, Antennen und Funkbojen. Sie sind hochbeanspruchte Komponenten, die unter folgenden Umweltbedingungen eine saubere Funktion gewährleisten müssen:

- Wechsellastzone → hohe Korrosionsbelastung + Bewuchs
- hohe Außendrucke bis zur Berechnungstauchtiefe des Uboots
- Temperaturbereich  $-20^{\circ}\text{C}$  bis  $+70^{\circ}\text{C}$
- Eis- und Sandbelastung je nach Einsatzgebiet
- Schockbelastungen durch mögliche Anspannung

Besonders die Korrosionsbelastung im Bereich der Spalte zwischen Trommel und Kabel, der Oberflächenverschleiß durch die Kabelbewegungen und die Bewuchsbildung stellen ein erhebliches Risiko für die Funktionsbereitschaft dar.

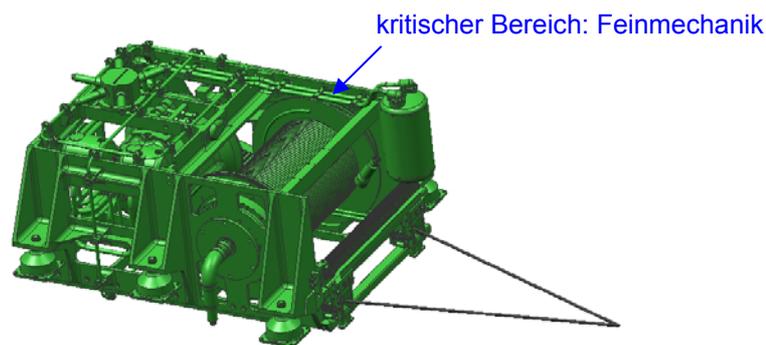


Abbildung 32 - Kabelwinde [F1]

Der Werkstoffeinsatz bietet demnach sowohl Vorteile aufgrund des geringen Gewichts als auch wegen der hohen Spaltkorrosionsbeständigkeit. Der Vorzugswerkstoff für diese Anwendung ist die Standardlegierung TiAl6V4 aufgrund der hohen Festigkeit und ausgezeichneten Verfügbarkeit. Allerdings sind die Oberflächen gegen Bewuchsbildung entsprechend zu behandeln, um die Funktion dauerhaft gewährleisten zu können.

### 7.15 Ballistikschutz

Der derzeitige Einsatz von Ubooten in Krisengebieten und die dortige Bedrohung durch Handfeuerwaffen im Küsten- oder Hafenbereich erfordern einen Schutz von Mensch und Material. Deshalb soll vor allem der Turmbereich gegen dieses Bedrohungsszenario durch die Verwendung von leichten und beschusssicheren Platten (nach STANAG 4569 Level 3) geschützt werden.



Abbildung 33 - Bereich für Ballistikschutz [F1]

In der bisherigen Ausführung als Stahl-Variante wurden dazu massive Platten (22mm stark) im Turmbereich integriert, so dass sich infolge des hohen Zusatzgewichts eine deutliche Beeinflussung der Gewichts- und Stabilitätsbilanz des Uboots ergab.



Abbildung 34 - Beschusstest von 1.3964-Platten, links: Vorderseite, rechts: Hinterseite [F1]

Der Einsatz von Titanlegierungen würde zu einer deutlichen Senkung des Gesamtgewichts für diese Panzerung führen. Die Wirksamkeit dieser Werkstoffklasse wurde anhand von Beschussversuchen mit verschiedenen Kalibern beim Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung bestätigt (siehe [P34]).

Dabei zeigte sich, dass Reintitan vergleichbare Eigenschaften aufweist wie die kostenintensivere Legierung TiAl6V4. Aufgrund der bisher erzielten Ergebnisse ist die Substitution einer Stahlpanzerung durch eine Reintitanvariante, eventuell auch mit anderen Zwischenwerkstoffen wie beispielsweise Keramik, durchaus empfehlenswert und begünstigt zudem die hydrostatische Stabilität bei der Verwendung im Turmbereich (im Vergleich zu einer Stahlpanzerung).

#### **Berechnungsbeispiel:**

Für eine zu schützende Turmfläche von ca. 30m<sup>2</sup> ergibt sich mit einer 20mm-Stahlpanzerung ein Zusatzgewicht von ca. 4700kg. Ein entsprechender Titanschutz würde nur ca. 2700kg wiegen und somit etwa 43% leichter sein als die vergleichbare

Stahlvariante. Durch den hohen Schwerpunkt der Panzerung ist eine Gewichtsminimierung an dieser Stelle empfehlenswert, um den Einfluss auf die Stabilität des Schiffes möglichst gering zu halten.

### 7.16 Sonstige Ausrüstung

Für Ausrüstungskomponenten wie beispielsweise Spille, Poller, Handläufe, Leitern etc. ist der Einsatz von Titan nur dann sinnvoll, wenn diese starken Korrosionsbelastungen unterliegen. Die Gewichtseinsparung beim Einsatz von Titan spielt aufgrund der geringen Massen für diese Systeme nur eine untergeordnete Rolle. Insofern zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit Titan verwendet werden soll, ist für mechanisch gering beanspruchte Komponenten (Bsp. Handläufe) ist eine kostengünstige und gut verfügbare Reintitanvariante (Bsp. Ti2) empfehlenswert. Für stark beanspruchte Komponenten (Bsp. Poller) ist hingegen die Legierung TiAl6V4 mit einer Beschichtung zur Erhöhung der Oberflächenhärte zu bevorzugen, um das Einarbeiten der Taue zu verhindern.

### 7.17 Sicherheits- und Rettungssysteme

Die Sicherheitssysteme an Bord eines Uboots dienen zur Rettung der Besatzung im Havariefall und kommen nur in seltensten Fällen oder überhaupt nicht zum Einsatz. Dennoch sind sie überlebensnotwendig und müssen auch in den letzten Betriebsjahren eines Uboots noch voll funktionstüchtig sein. Während der normalen Betriebszeit sind diese Komponenten jedoch zusätzlicher Ballast, dessen Gewicht zu optimieren ist. Zur Reduzierung des Gesamtgewichts und zur Verbesserung der Handhabung dieser Komponenten eignen sich besonders Leichtmetalle oder Faserverbundstrukturen.

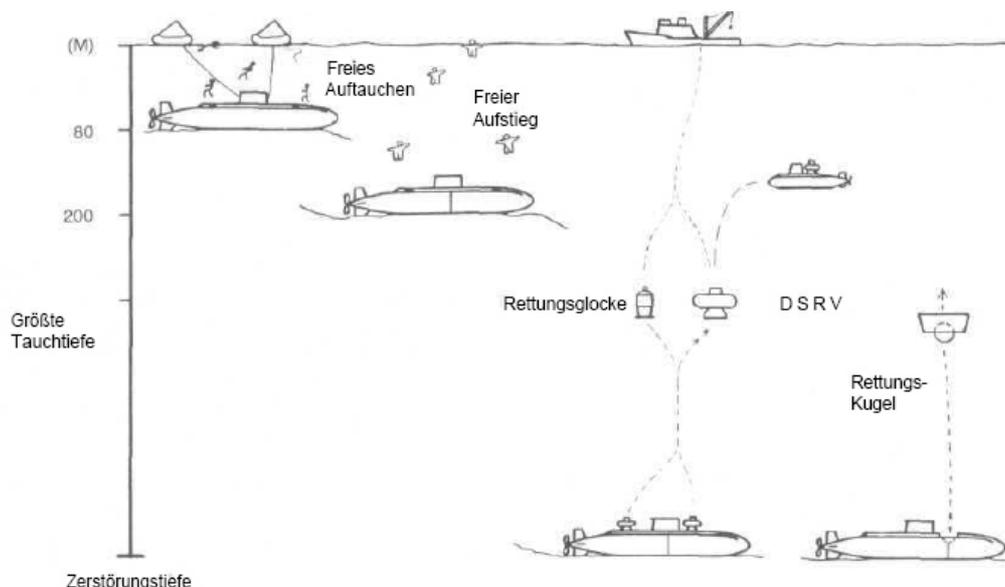


Abbildung 35 - Rettungssysteme [P31 S.121]

### 7.17.1 Druckfeste Schotttür

Die druckfeste Schotttür dient zur wasserdichten Trennung zweier Sektionen im Havariefall. Die ursprüngliche Bauweise eines Schotts ist eine Halbkugelschale, durch die sowohl der Personendurchgang als auch der Materialtransport zwischen den getrennten Sektionen erfolgt. Aufgrund des Kreisquerschnitts ergeben sich jedoch deutliche Einschränkungen in der Durchgangsfähigkeit bzw. im Komfort.

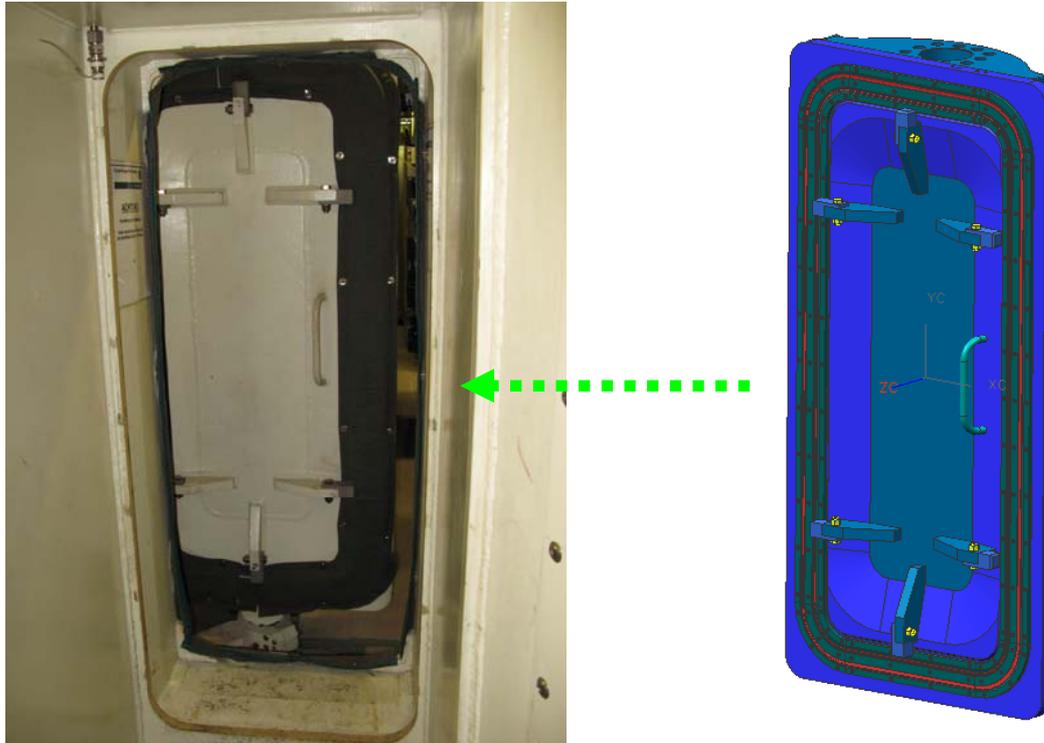


Abbildung 36 - Schotttür: links: Einbau, rechts: CAD [F1]

In der neuen Generation werden diese Schotts deshalb als hohe Türen ausgeführt, so dass der Durchgang wesentlich erleichtert wird. Konstruktiv bringt diese Variante wegen des großen Rechteckquerschnitts jedoch einige Nachteile mit sich: Aufgrund der erforderlichen Dichtheit vom Wasserdruck an der Oberfläche bis zum Berechnungsdruck des Druckkörpers muss diese Tür inklusive der Zarge eine hohe Steifigkeit aufweisen, um unter dem großen Druckspektrum die erforderliche Dichtigkeit aufzuweisen. Die bisherigen Stahlvarianten besitzen damit ein sehr hohes Gewicht, so dass diese teilweise nicht mehr von Hand bedient werden können. Die Anwendung von Leichtbauwerkstoffen in Kombination mit einem neuen Öffnungs- und Schließmechanismus besitzt daher ein enormes Verbesserungspotenzial hinsichtlich Gewicht und Bedienbarkeit. In einem zukünftigen F&E-Vorhaben bei der HDW GmbH wird diese Tür gewichts- und festigkeitstechnisch optimiert. Die Angabe von möglichen Perspektiven kann aus patentrechtlichen Gründen an dieser Stelle deshalb nicht erfolgen.

### 7.17.2 Rettungskugel

Die Rettungskugel ist eine bootseigene Sicherheitseinrichtung, die bis zur Zerstörungstauchtiefe eines Uboots funktionsfähig ist. Sie ist fest im Oberdeck bzw. in der Druckkörperstruktur integriert und bietet Platz für die gesamte Besatzung.

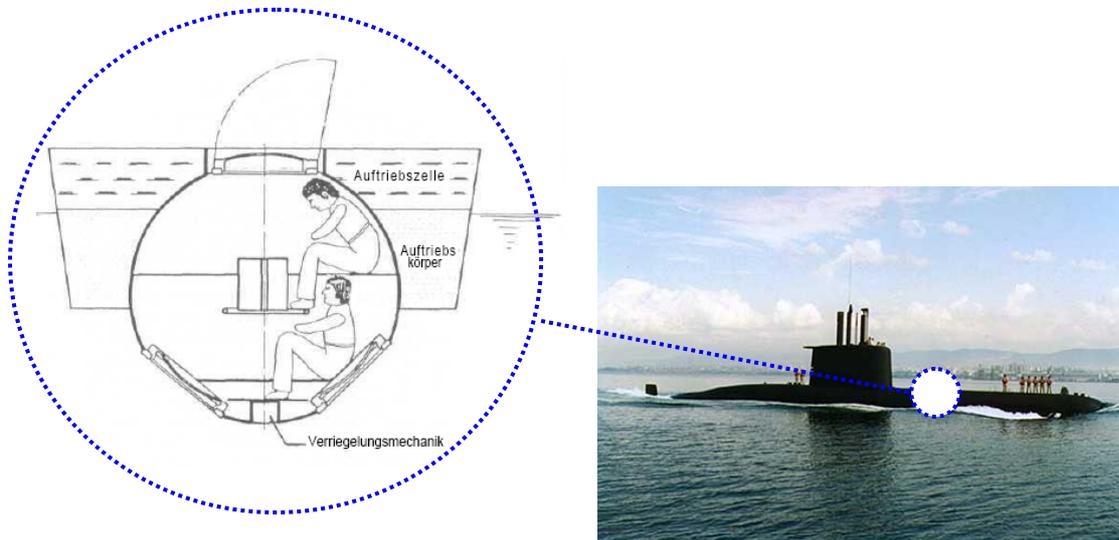


Abbildung 37 - Rettungskugel [P31 S.120]

Aufgrund der notwendigen Größe einer solchen Komponente ist das Zusatzgewicht für den Normalbetrieb eines Boots extrem groß, so dass für diese Anwendung der Einsatz von Leichtbauwerkstoffen wie beispielsweise Titan deutliche Vorteile im Hinblick auf die Massenbilanz mit sich bringt. Die Verformung durch den Tauchdruck ist bei dieser Komponente ebenfalls nicht so entscheidend für die Materialauswahl wie sie es beispielsweise beim Druckkörper selbst ist. Demzufolge besitzt das E-Modul nur eine untergeordnete Priorität. In verschiedenen zivilen Forschungstauchbooten wurden bereits kugelförmige Druckkörper aus Titan erfolgreich integriert.



Abbildung 38 - Druckkörper Forschungstauchboot ALVIN [I6]

Nur der Einsatz von Titan konnte dabei die erforderliche Tauchtiefe unter Einhaltung eines maximal zulässigen Gewichts ermöglichen.

### 7.17.2.1 Beispielberechnung

Im folgenden Berechnungsbeispiel werden ideale Kugelbehälter unter Außendruckbeanspruchung miteinander verglichen:

Tabelle 20 - Berechnungsbeispiel Kugeldruckbehälter

Werkstoff	HY80 (1.6780)	1.3964	3.7195	3.7165
<b>Dichte <math>\rho</math> [g/cm<sup>3</sup>]</b>	7,9	7,9	4,5	4,4
<b>Stauchgrenze <math>R_p</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	550	470	630	900
<b>Kugelaußenradius <math>r_a</math> [mm]</b>	1500	1500	1500	1500
<b>fiktiver Umgebungsdruck <math>p</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	8	8	8	8
<b>erforderliche Wandstärke</b> $t = \frac{p \cdot r \cdot 1,6}{2 \cdot R_p} \text{ [mm]}$ Formel 16 - erforderliche Wandstärke für Kugelbehälter [P36, S.295]	18	21	16	11
<b>Gewicht der Kugel</b> $m = \rho \cdot \frac{4}{3} \cdot \Pi \cdot (r_a^3 - r_i^3) \text{ [kg]}$	3973	4625	2014	1389
<b>Gewicht relativ zur HY80-Variante [%]</b>	<b>100</b>	<b>116</b>	<b>51</b>	<b>35</b>

Obwohl diese Berechnungen keine Fertigungstoleranzen oder Materialunregelmäßigkeiten der Kugel berücksichtigen, andere Belastungen außer der Tauchdruck nicht betrachtet werden und die Ergebnisse somit nicht direkt in die Praxis übertragen werden können, ist dennoch das große Potential beim Einsatz von Titanwerkstoffen in dieser Komponente erkennbar. Beim Einsatz einer hochfesten Titanlegierung können Gewichtseinsparungen von bis zu 65 Prozent erzielt werden. Das so eingesparte Gesamtgewicht bewirkt eine Verbesserung der Gewichtsbilanz des Bootes und eine Optimierung der Stabilität.

### 7.17.2.2 Fazit

Der Einsatz von Titanwerkstoffen im Bereich der Rettungskugel bietet enorme Vorteile in Bezug auf das Gesamtgewicht einer solchen Einrichtung. Für einen detaillierten Vergleich ist jedoch die erforderliche Materialstärke in Abhängigkeit der Kontur, Vorverformung und der Fertigungstoleranzen zu ermitteln.

### 7.17.3 Teleskopierbarer Schacht

Bei der Verwendung eines druckfesten Schotts zwischen zwei Sektionen eines Uboots sind diese jeweils mit einer Notausstieginrichtung auszustatten. Auf modernen Ubooten ist deshalb die Integration eines teleskopierbaren Schachtes möglich, der als Notschleusensystem bei auf Grund liegendem Boot dient.

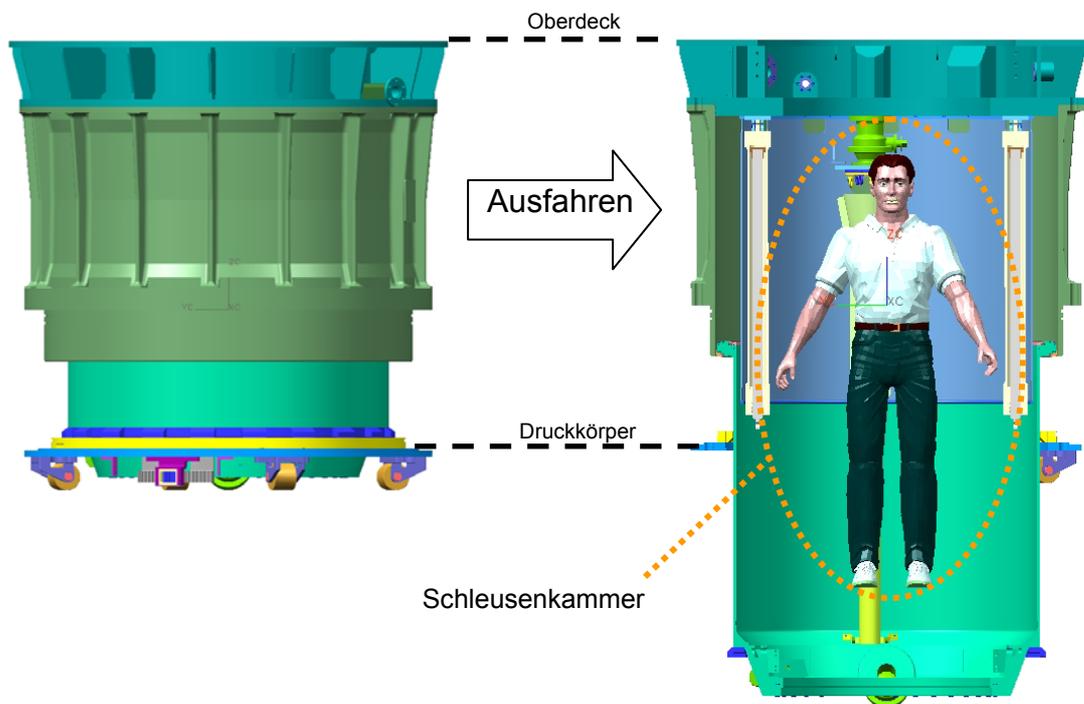


Abbildung 39 - Teleskopierbarer Schacht [F1]

Im eingefahrenen Zustand befindet sich der Teleskopschacht vollständig im Oberdeck und beansprucht somit keinen Bauraum im Innenschiff. Beim Notausstieg wird der Teleskopschacht in den Innenraum des Bootes ausgefahren und dient als Schleusenvorrichtung, um entweder die Besatzung zu evakuieren oder einen Materialtransport in das Boot (Bsp. Werkzeuge) zu gewährleisten.

Auch hier bietet der Einsatz einer Leichtmetall-Titan-Legierung einen deutlichen Gewichtsvorteil des Gesamtsystems. Bei der konstruktiven Auslegung der Funktionsflächen sind jedoch die Gleiteigenschaften des Titans unbedingt zu berücksichtigen.

### 7.18 Maschinenbaukomponenten

An Bord eines modernen Schiffes gibt es eine Vielzahl von Maschinenbaukomponenten, angefangen von Ausbringwinden im Oberdeck über die Torpedo-Transport- und -Stauvorrichtung bis zu verschiebbaren Kojen für die Besatzung.

### 7.18.1 hochbeanspruchte Bauteile

Reintitan und Titanlegierungen besitzen wegen der vielseitig einstellbaren Materialeigenschaften ein großes Spektrum an Dehngrenzen bis über  $1000\text{N/mm}^2$ . In kompakten Maschinenbaukomponenten können die gebräuchlichen Edelstähle aufgrund ihrer geringen Festigkeiten (Bsp. 1.4462 mit  $450\text{N/mm}^2$ ) teilweise nicht eingesetzt bzw. nur in Verbindung mit einer Bauraumerweiterung integriert werden. Hochfeste Titanlegierungen wie beispielsweise TiAl6V4 oder TiAl6V6Sn2 bieten somit die Möglichkeit hochbeanspruchte Bauteile noch kompakter zu gestalten.

#### **Praxisbeispiel:**

Für einen Transportmechanismus sollte eine Kupplung entwickelt werden, die sowohl eine hohe axiale Zug- oder Druckbeanspruchung aufnehmen kann, als auch extreme Bauraumanforderungen erfüllen muss. Für diese Komponente war weder die Anwendung von Edelstählen aufgrund der geringen Festigkeiten, noch der Einsatz von Einsatzstählen wegen der geringen Korrosionsbeständigkeit möglich. Nur die Verwendung des Werkstoffs TiAl6V4 konnte die Forderungen an Festigkeit bei hoher Korrosionsbeständigkeit erfüllen.

### 7.18.2 Handlingkomponenten

Titanlegierungen weisen eine geringe Dichte bei hoher Festigkeit auf und sind somit bestens geeignet für Komponenten wie beispielsweise Zug-/Schubstangen, die manuell gehandhabt werden müssen. Die teilweise enormen Gewichtseinsparungen erleichtern die Handhabung und bewirken deshalb eine deutliche Verbesserung der Ergonomie.

Als Vorzugswerkstoff für diese Handlingkomponenten dient die handelsübliche Legierung TiAl6V4, die in einem großen Spektrum an Halbzeugabmessungen verfügbar ist. Dieser Werkstoff weist eine sehr hohe Festigkeit auf, ist jedoch nur sehr schwer kalt umformbar. Für Anwendungen bei deren Verarbeitung eine Kaltumformung stattfindet, ist deshalb der Werkstoff TiAl3V2,5 zu bevorzugen.

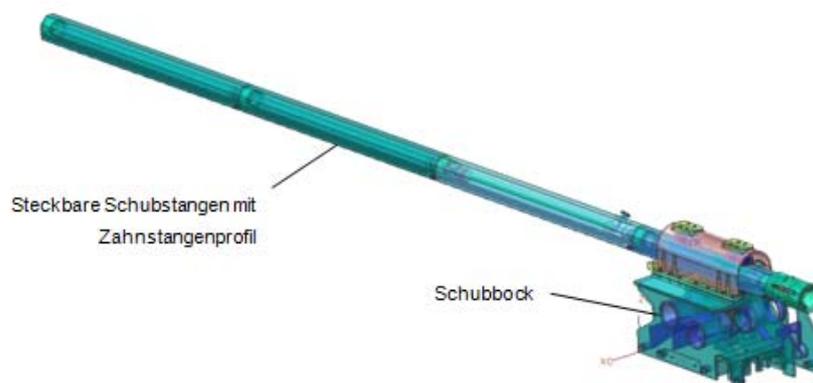


Abbildung 40 - Ladesystem [F1]

**Beispielanwendung:**

In einem F&E-Projekt von HDW sollte das Handling von Schubstangen für die Schiffsausrüstung verbessert werden. Diese Schubstangen werden vom Bediener manuell mit einer Hand in eine Transportvorrichtung eingesetzt, so dass das Gesamtgewicht der Messingkomponenten mit 22kg eine relativ geringe Ergonomie bewirkt. Durch die Werkstoffsubstitution mit TiAl6V4 und die damit verbundene höhere Festigkeit bei wesentlich geringerer Dichte konnte eine Gewichtsreduzierung von 36% auf 14kg erzielt werden. Die Ergonomie wurde dadurch deutlich gesteigert.

### **7.18.3 Gleitführungen**

Gleitführungen aus Titan in Verbindung mit einem Kunststoff sind durch die hohe Spaltkorrosionsbeständigkeit von Titan besonders für Anwendungen im Außenschiff sehr interessant. Jedoch eignet sich unbehandeltes Titan wegen des hohen Reibwerts, der daraus resultierenden Neigung zum Fressen und der geringen Oberflächenhärte nicht als Werkstoff für Gleitführungen. Demzufolge sind Beschichtungen (Bsp. Nitrieren) für gleitende Oberflächen unbedingt erforderlich, wobei jedoch auf die Korrosionsverträglichkeit zwischen Beschichtung, Basismaterial und Werkstoff des Gleitkörpers zu achten ist.

Ein Einsatz von Titanführungen ist trotz Beschichtung dennoch sinnvoll, da Fehlstellen in der Oberfläche durch die Oxidschichtbildung des Trägermaterials vor Korrosion geschützt werden.

### **7.18.4 Verzahnungsgetriebe**

Verzahnungsgetriebe aus Titan besitzen sowohl eine hohe Korrosionsbeständigkeit als auch ein geringes Gewicht und eine daraus resultierende geringe Rotationsträgheit und sind deshalb besonders interessant für Anwendungen im Seewasserbereich bzw. Präzisionsanwendungen im Innenschiff. Aufgrund der hohen Festigkeiten bei gleichzeitig hoher Elastizität von wärmebehandelten Beta-Legierungen (Bsp. TiV15Cr3Al3Sn3) und die hohen Oberflächenhärten durch Nitrieren (Bsp. 2500HV) sind Verzahnungselemente aus Titan besonders kompakt. Allerdings ist (wie bei Gleitführungen) eine Oberflächenbeschichtung zur Reibwertminimierung unbedingt erforderlich. Bevor jedoch Titan als Verzahnungswerkstoff integriert werden kann, sind die notwendigen Berechnungseigenschaften Zahnfußfestigkeit, Zahnflankenfestigkeit u.s.w. für den jeweiligen Werkstoff zu ermitteln.

### **7.18.5 Gewindetriebe**

Der Einsatz von Titan in Gewindetrieben ist wegen der geringen Oberflächenhärte und der Neigung zum Fressen nicht ohne eine entsprechende Beschichtung möglich. Für diese Anwendung sind Beschichtungen mit hoher Oberflächenhärte, hoher

Verschleißfestigkeit und geringer Reibung wie beispielsweise Keramikbeschichtungen oder eine Oberflächennitrierung erforderlich.

Gewindetribe aus Titanwerkstoffen besitzen gegenüber den herkömmlichen Spindeln aus Vergütungsstahl folgende Vor- und Nachteile:

Vorteile:

- geringes Gewicht
- geringe Trägheit → Vorteil in hochdynamischen Anwendungen
- hohe Korrosionsbeständigkeit → Vorteil für Anwendungen im Außenschiff
- geringer Wartungsaufwand (kein Ölen zur Korrosionsvermeidung erforderlich)

Nachteile:

- Beschichtung erforderlich
- hohe Materialkosten
- geringes E-Modul → höhere Verformungen + geringere Knicksicherheit

Aufgrund der hohen Korrosionsbeständigkeit sind Gewindetribe aus Titanwerkstoffen durchaus für Anwendungen in der Meerestechnik empfehlenswert. Als Standardlegierung für den Einsatz in Gewindetrieben ist der gut verfügbare und hochfeste ASTM-grade 5 (TiAl6V4) empfehlenswert.

### 7.18.6 Hydraulikzylinder / -motoren

Auf sämtlichen Schiffen sind Hydraulikkomponenten wie beispielsweise Hub- und Drehvorrichtungen im Außenschiffbereich unbedingt erforderlich. In diesem Anwendungsbereich ist jedoch selbst der Einsatz von hochlegierten Edelstählen (Bsp. 1.4462 oder 1.3964) durch die hohe Spaltkorrosionsbelastung in Verbindung mit den Elastomerdichtungen nicht optimal. Demzufolge ist Titan wegen der hohen Spaltkorrosionsbeständigkeit als Kolbenstangenwerkstoff bestens geeignet. Für hochdynamische Anwendungen sind außerdem die geringe Dichte und die daraus resultierende geringe Trägheit vorteilhaft. Dennoch ist auch bei dieser Anwendung eine Beschichtung zur Reibwertverringerung unverzichtbar. Bei der Dimensionierung ist außerdem auf das geringe E-Modul und die daraus resultierenden, relativ großen Verformungen zu achten.

Als Vorzugswerkstoff wird ebenfalls die hochfeste und gut verfügbare Legierung TiAl6V4 empfohlen, da bei diesen Anwendungen keine Kaltumformung erforderlich ist.

### 7.18.7 Normteile

Normteile aus Titan wie beispielsweise Schrauben, Muttern und Zylinderstifte eignen sich angesichts der äquivalenten physikalischen und chemischen Eigenschaften vor allem zur Verbindung von Titankomponenten. Allerdings sollte aufgrund der relativ hohen Kosten für den Einkauf, die Lagerung und die Verwaltung dieser Normteile bei

immer die Möglichkeit zur Verwendung von standardisierten V4A-Stahl-Normteilen geprüft werden, da diese meist in den betrieblichen Normteilbeständen schon vorhanden sind.

### 7.18.8 Federn

Titan ist wegen der hohen Korrosionsbeständigkeit, dem geringen E-Modul und der geringe Dichte optimal geeignet für Federanwendungen, nicht nur in der Meerestechnik. So wurden Titanfedern aus speziell entwickelten, kostengünstigen Legierungen wie beispielsweise  $\text{TiFe}_{4,5}\text{Mo}_{6,8}\text{Al}_{1,5}$  bereits erfolgreich in der Kraftfahrzeugtechnik eingesetzt.



Abbildung 41 - VW Lupo [www.autoplenum.de 13.07.2010]

Durch das geringe E-Modul kann die Anzahl der Windungen bei gleich bleibender Federkennlinie und Vergrößerung des Drahtdurchmessers im Vergleich zu Federn aus Stahl reduziert werden. Das Gesamtgewicht wird somit sowohl durch den geringeren Materialeinsatz als auch durch die niedrigere Materialdichte deutlich verringert, woraus sich besonders bei den großen Dimensionen der Federn im Schiff- und Schwermaschinenbau deutliche Gewichtseinsparungen ergeben.

Die bisherigen Stahldruckfedern der Lukendeckel weisen durch die hohen Federkräfte ein enormes Gewicht auf und sind aufgrund des großen Schadensrisikos der Beschichtung durch den Materialtransport in das bzw. aus dem Uboot einer hohen Korrosionsbelastung ausgesetzt. Bei dieser Anwendung ist der Einsatz von Titanfedern optimal, da diese einerseits das Gewicht und andererseits auch die Korrosionsbelastung deutlich reduzieren.

**Berechnungsbeispiel:**

In der folgenden Tabelle ist das Ergebnis der Werkstoffsubstitution dargestellt:

Tabelle 21 - Berechnungsbeispiel Druckfeder

Parameter	Stahl-Feder	Titanfeder
<b>Werkstoff</b>	1.4571 - X6CrNiMoTi 17-12-2	TiAl3V6Cr6Mo4Zr4 (Beta C)
<b>Drahtdurchmesser [mm]</b>	16	16
<b>Außendurchmesser [mm]</b>	142	142
<b>federnde Windungen</b>	10	11,15
<b>Ungespannte Länge [mm]</b>	469	468
<b>Federkonstante [N/mm]</b>	28,67	29,12
<b>Federgewicht [kg]</b>	7,8	4,8
<b>Kosten pro Stück [€]</b>	340	1000

Im Vergleich zur bisherigen Stahl-Feder besitzt die Titanfeder ein um 38 Prozent reduziertes Gewicht. Der größere Vorteil ist jedoch die erhöhte Korrosionsbeständigkeit gegenüber der bisher eingesetzten Stahlfeder. Beide Faktoren sind der Grund dafür, dass dieser Federnwerkstoff vor allem im Flugzeugbau oder in der Spezialfahrzeugtechnik eingesetzt wird.

**7.18.9 Fazit**

Für den Einsatz in maschinenbaulichen Komponenten in der Meerestechnik besitzt Titan aufgrund der Materialeigenschaften ein enormes Leistungspotenzial. Dennoch ist die Verwendung nicht für jede Anwendung sinnvoll und somit stets zu prüfen, zumal das Herstellerspektrum beispielsweise für Titanfedern sehr gering ist und demzufolge nicht alle Dimensionen verarbeitet werden können.

Als Vorzugswerkstoff im maschinenbaulichen Bereich ist der marktübliche TiAl6V4 zu empfehlen, da dieser Werkstoff eine ausgezeichnete Kombination von Festigkeit, Korrosionsresistenz, Verarbeitbarkeit und Verfügbarkeit besitzt.

**7.19 Waffensysteme**

Die Waffensysteme dienen einerseits zur Übernahme und Lagerung von einer Vielzahl an verschiedenen Waffentypen und andererseits auch zu deren Verschuss zur Bekämpfung von gegnerischen Zielen. Bei den konventionellen Ubooten stellt

das Hauptbewaffnungssystem der Torpedorohrsatz mit der dahinter liegenden Torpedo-Transport-und-Staueinrichtung dar.

### 7.19.1 Torpedorohre

Die Torpedorohre befinden sich am vorderen Ende des Vorschiffs und dienen sowohl zur Lagerung und zum Verschießen der Waffen als auch zur deren Übernahme. Aufgrund der Wasserdruckbelastung des Rohrs bei geöffneten Außenhaut- und Mündungsklappen sind diese Komponenten nach den Druckkörperrichtlinien für Uboote auszulegen.

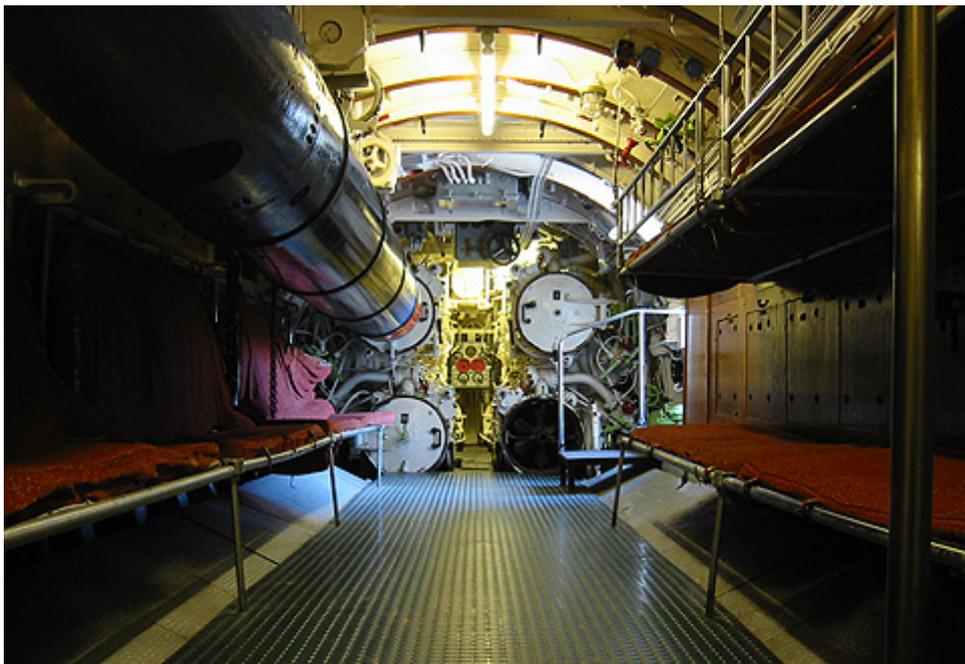


Abbildung 42 - Torpedosektion Tauchboot Typ VII [www.uboot-netz.de, 13.07.2010]

Die Torpedorohre werden in den vorderen Endboden eingesetzt und verschweißt. Der Werkstoff für diese Komponente sollte deshalb der gleiche wie beim Druckkörper sein. Eine Kombination von Stahl mit Titan ist aus Fertigungsgründen nicht empfehlenswert, zumal die Vorteile von Titan bei dieser Komponente sich lediglich in der Gewichtseinsparung widerspiegeln. Der Vorteil der hohen Korrosionsbeständigkeit besitzt bei dieser Anwendung nur eine sekundäre Bedeutung, weil sämtliche Oberflächen zur Vermeidung von Bewuchs beschichtet werden müssen.

### 7.19.2 Torpedoausstoßsystem

Das Torpedoausstoßsystem befindet sich in den Torpedorohren und dient zum Verschuss der Waffen. Generell besitzen die verschiedenen maschinenbaulichen Komponenten der Ausstoßsysteme eine Vielzahl an Funktionsflächen, die sich im direkten Seewasserkontakt befinden und somit einer hohen Korrosionsbelastung unterliegen. Außerdem sind diese Komponenten bedingt durch den geringen

Bauraum möglichst kompakt zu gestalten. Der Einsatz von Titan ist deshalb aufgrund der hohen Korrosionsbeständigkeit und Festigkeit für diese Komponente durchaus empfehlenswert. Allerdings ist bei gleitendem Kontakt auf eine entsprechende Oberflächenbehandlung zur Reibwertminimierung zu achten.

### 7.19.3 Torpedo-Transport-und-Staueinrichtung (ToTS)

Die ToTS besteht aus einer Vielzahl an Mulden oder Containern zur schocksicheren Lagerung der Waffen im Uboot. Da sich diese im gestauten Zustand nicht direkt hinter den Torpedorohren befinden, ist ein Transportsystem erforderlich, um die Mulden hinter den Rohren positionieren und anschließend die Waffen ins Rohr schieben zu können.

#### 7.19.3.1 Mulden / Container

Die Mulden / Container dienen zur Lagerung der Waffen. Auf ihnen ist zusätzlich das Vorschubsystem integriert, um die Waffen in das Torpedorohr schieben zu können. Für eine sichere Lagerung und einen fehlerfreien Waffentransport sind deshalb eine geringe Durchbiegung und demzufolge eine hohe Biegesteifigkeit der Mulden bzw. Container erforderlich.

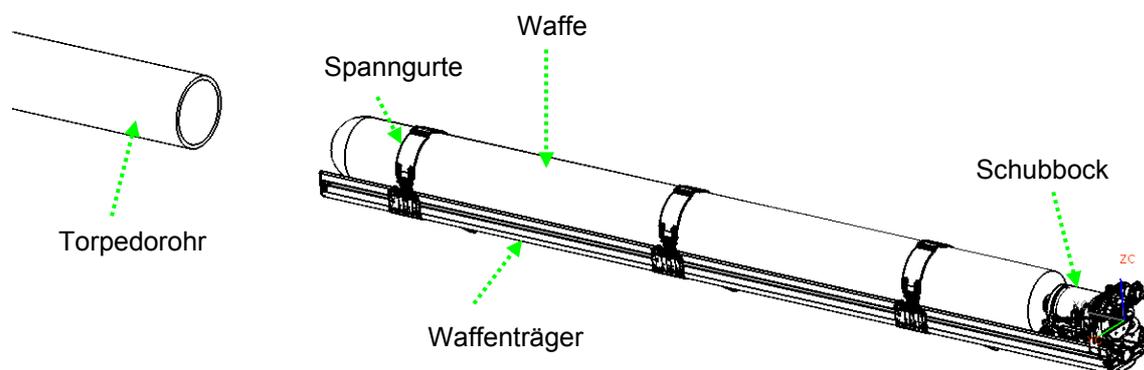


Abbildung 43 - Waffenlagerungssystem [F1]

Der Einsatz von Titan bei diesen tragenden Strukturen ist jedoch nicht generell empfehlenswert, da bei dieser Anwendung im Allgemeinen die Durchbiegung und nicht die Festigkeit das Hauptproblem darstellt. Titan weist einen geringen E-Modul auf und dieser kann wegen der engen Bauraumverhältnisse nicht mittels zusätzlichem Bauraum kompensiert werden. Für diese Anwendung ist somit der Einsatz von CFK-Komponenten mit hochmodularen Fasern zu bevorzugen.

#### 7.19.3.2 Transportsystem

Dieses System dient zum horizontalen und vertikalen Transport der Mulden / Container innerhalb des Uboots. Für die Bewertung des Einsatzes von Titan sind deshalb die einzelnen Maschinenbaukomponenten getrennt zu bewerten.

#### 7.19.4 Waffen

Die an Bord eines Uboots eingesetzten Waffen dienen der Bekämpfung sowohl von Unter- und Überwasserzielen durch Torpedos als auch von Luft- und Küstenzielen durch Flugkörper.

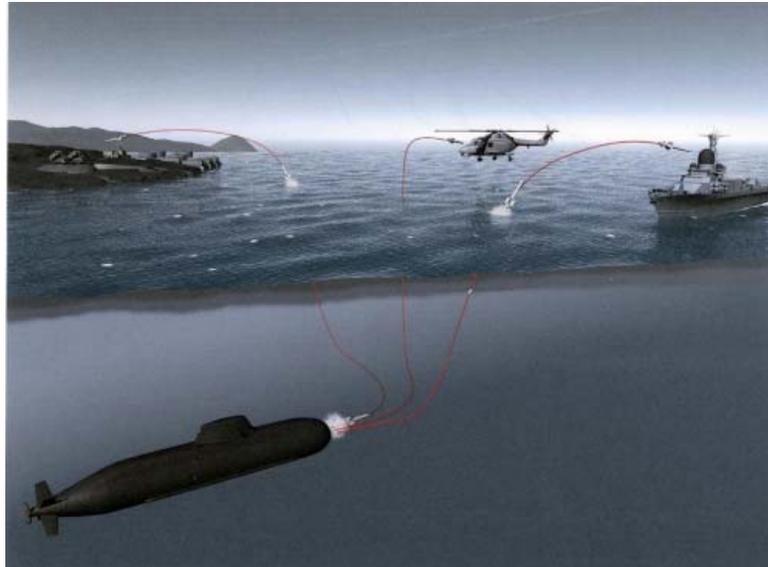


Abbildung 44 - Waffe "IDAS" [15]

Die hohen erforderlichen Geschwindigkeiten der modernen Waffentechnik bedingen einen konsequenten Leichtbau, vor allem bei den druckfesten Hüllen und den Antriebs- und Stabilisierungskomponenten. Der Einsatz von Titan ist demnach vor allem für festigkeitskritische Komponenten interessant, die nicht aus Faserverbund hergestellt werden können. Ein weiterer Vorteil von Titan ist außerdem die hervorragende Korrosionsbeständigkeit für den Transport im Torpedorohr.

#### 7.20 Tanks / Zellen

Die Tanks und Zellen bei einem Uboot dienen einerseits zur Bunkerung von Verbrauchsmaterial (Diesel, Sauerstoff, Wasserstoff...), andererseits auch zur Einstellung der Stabilität (Regelzellen, Trimmzellen...).

##### 7.20.1 Druckkörper-integrierte Zellen

Der Einsatz von Titan in Tauch-, Regel- und Trimmzellen wird grundsätzlich durch die Art des Druckkörperwerkstoffs bestimmt, da diese Zellen mittels Schweißverbindungen unmittelbar mit dem Druckkörper verbunden sind. Für Stahl Druckkörper sind deswegen Zellen aus Titan aufgrund der Anbindungsprobleme nicht empfehlenswert. Bei Titandruckkörper ist es ebenfalls ratsam, den gleichen Werkstoff wie für den Druckkörper zu verwenden, jedoch ist wegen der großen Elektrodenfläche und der Biokompatibilität unbedingt auf eine entsprechende Beschichtung der Tankinnenwände zu achten.

## 7.20.2 Außenliegende Tanks

Für die Uboote der neuesten Generation werden außen liegende Tanks vor allem für den Transport von Wasserstoff und Sauerstoff für den Brennstoffzellenantrieb verwendet. Der Wasserstoff wird dabei in Metallhydridspeichern aufgenommen und der Sauerstoff in flüssiger Form in außendruckfesten Tanks gestaut. Eine Feindimensionierung unter dem Gesichtspunkt der Gewichtsreduzierung ist dabei enorm wichtig, da eine Vielzahl an Tanks zur Vergrößerung der Reichweite des Brennstoffzellenantriebs transportiert werden und somit die Gesamtmasse einen hohen Einfluss auf die Stabilität des Uboots besitzt.



Abbildung 45 - gedocktes Uboot mit sichtbaren Metallhydridspeichern [F1]

### 7.20.2.1 Metallhydridspeicher

In außenbords angeordneten Metallhydridspeichern wird der Wasserstoff für den Brennstoffzellenantrieb transportiert. Die Speicher bestehen dabei aus einer metallischen Hülle und innen liegenden Kassetten mit einem granulatförmigen Metall zur Wasserstoffaufnahme, wobei im Vergleich das Speicher-Metall (ca. 77%) ein deutlich höheres Gewicht als der umgebende Stahlbehälter (ca. 13%) besitzt. Eine Gewichtsreduzierung der Hülle durch eine Substitution mit Titan führt deshalb prozentual nur zu unwesentlichen Gewichtsvorteilen. Erst im Hinblick auf die Gewichtsverringerng aller Speicher ergibt sich ein positiver Einfluss auf die Gewichtsrechnung des Bootes.

Eine Schwierigkeit im Hinblick auf die Werkstoffänderung ist die erforderliche sehr hohe Duktilität des Hüllenwerkstoffs aufgrund der Volumenänderung des Metallgranulats während der Speicherung des Wasserstoffs, welches zu einer symmetrischen Ausbeulung der Hülle führt. Die Tauchdruckbelastung besitzt dabei nur eine untergeordnete Priorität, weil die Kassetten eine massive Verstärkung der äußeren Hülle darstellen. Gemäß der Druckkörperverordnung (TÜV-AD Merkblatt W1) kommen dafür nur Werkstoffe in Betracht, die nach einer Kaltumformung (durch Ausbeulung) von 6 Prozent noch eine Bruchdehnung von >16 Prozent und eine

Kerbschlagarbeit von >27 Joule besitzen. Entscheidend für die Eignungsbeurteilung eines Werkstoffes ist demnach das Kaltverfestigungsdiagramm.

Für diese Anwendung kommen somit nur die Reintitanwerkstoffe Ti1 und Ti2 für in Betracht, die jedoch nur eine geringe Festigkeit besitzen und deshalb eine größere Behälterwandstärke erfordern. Die damit verbundene Wandstärkenerhöhung verkleinert wiederum den Gewichtsvorteil.

**Beispielberechnung:**

Für folgende zylindrische Hülle ist eine festigkeitsoptimierte Dimensionierung durchzuführen:

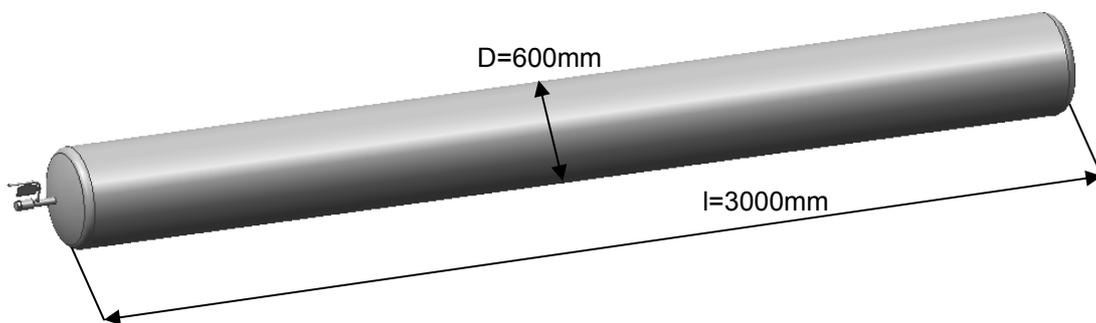


Abbildung 46 - Metallhydridspeicher - CAD [F1]

Bei äußerem Überdruck (Speicher nicht in Betrieb + maximale Tauchtiefe) kann die Unterstützung der Kassetten berücksichtigt werden und somit verringert sich die freitragende Länge. Bei innerem Überdruck (Speicher in Betrieb + Boot aufgetaucht) wirken die Kassetten nicht als Unterstützung, da diese nur in die Hülle formschlüssig eingeschoben werden. Für beide Zustände werden Beispielberechnungen für einen Hohlzylinder gemäß [N16], [N17] und [N18] durchgeführt. Weiterhin wird die minimale Wandstärke des Zylindermantels für den Transport des Behälters mit der Aufnahme jeweils an den Enden berechnet. Diese Überprüfung ist notwendig, weil das Kassettengewicht im Inneren des Behälters relativ hoch ist. Die Grundlage dafür bildet ein Biegebalken mit einer Streckenlast.

Tabelle 22 - Berechnung Metallhydridspeicher

Merkmal	Behälter 1.3964	Behälter Ti2
<b>Vorgaben</b>		
<b>Dehngrenze <math>R_{P0,2}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b> Anmerkung: Da die Kaltumformung zwischen 0 und 6% liegt muss hier der geringste Wert eingesetzt werden.	430	275
<b>Dichte <math>\rho</math> [g/cm<sup>3</sup>]</b>	7,9	4,5
<b>E-Modul [N/mm<sup>2</sup>]</b>	200000	105000
<b>Querkontraktionszahl <math>\nu</math></b>	0,3	0,3
<b>Verarbeitungsfaktor <math>\nu</math></b> Gemäß [N16] berücksichtigt der Verarbeitungsfaktor $\nu$ Schwächungen in der Verarbeitung (Bsp. Schweißen). Der Faktor $\nu$ ist hier ein Schätzwert.	0,3	0,3
<b>angenommene Unrundheit [%]</b>	1,5	2,0
<b>Sicherheitsbeiwert gegen elastisches Beulen <math>S_K</math> gemäß [N17]</b>	3	3
<b>Sicherheitsbeiwert gegen plastisches Beulen <math>S</math> gemäß [N17]</b>	1,6	1,7
<b>Dimensionierung der Wandstärke bei innerem Überdruck</b>		
<b>maximaler innerer Überdruck <math>p_i</math> [bar]</b>	50	50
<b>erforderliche Wandstärke bei innerem Überdruck <math>s_i</math> [mm]</b> $s_i = \frac{D_a \cdot p}{20 \cdot \frac{R_{P0,2}}{S} \cdot \nu + p} + c_1 + c_2$ Formel 17 - Zylinderschale unter Innendruck [N18] Anmerkung: Die Korrosionszuschläge $c_1$ , $c_2$ sind wegen der ausgezeichneten Korrosionsbeständigkeiten der Werkstoffe vernachlässigbar.	1,7	3,3
<b>Dimensionierung der Wandstärke bei äußerem Überdruck</b>		
<b>maximaler äußerer Überdruck <math>p_a</math> [bar]</b>	50	50

<b>angenommene Wandstärke bei äußerem Überdruck <math>s_a</math> [mm]</b>	8	10
<b>Nachweis kritischer Druck bei elastischem Beulen <math>p_1</math> [bar] gemäß [N17]</b>	65	60
<b>Nachweis: kritischer Druck bei plastischem Beulen <math>p_2</math> [bar] gemäß [N17]</b>	298	186
<b>kritischer Berechnungsdruck (Außendruck) <math>p = \text{MIN}[p_1; p_2]</math> [bar]</b>	65 → äußerer Überdruck OK!	60 → äußerer Überdruck OK!
<b>Zusammenfassung der Ergebnisse</b>		
<b>minimale Wandstärke des Behälters <math>s = \text{MAX}[s_{a1}; s_a]</math> [mm]</b>	8	10
<b>Gewicht der zylindrischen Hülle <math>m</math> [kg]</b>	355	251
<b>Gewicht im Vergleich zur 1.3964-Variante [%]</b>	100	71

**Fazit:**

Für die angenommene Geometrie des Speicherbehälters ist nach der Werkstoffsubstitution von Stahl durch Titan eine Gewichtseinsparung pro Behälter von ca. 100 kg bzw. 29 Prozent erreicht worden. Für das gesamte Boot mit einer angenommenen Anzahl von 30 Metallhydridspeichern wird deshalb schätzungsweise nur eine Gewichtseinsparung von ca. 3000kg erreicht. Allerdings sind dabei auch die erhöhten Fertigungskosten für die Titanvariante zu berücksichtigen. Die Werkstoffsubstitution von Stahl durch Titan für die Hüllen der Metallhydridspeicher ist demnach nur bei gewichtskritischen Booten empfehlenswert.

**7.20.2.2 Sauerstoffspeicher**

In Speichern wird flüssiger Sauerstoff für die Brennstoffzellenanlage transportiert. Dabei wird unterschieden zwischen im Druckkörper angeordneten Tanks, die nur innendruckbeaufschlagt und im Oberdeck untergebrachten Speichern, die sowohl durch den Betriebs- als auch durch den Tauchdruck belastet sind.

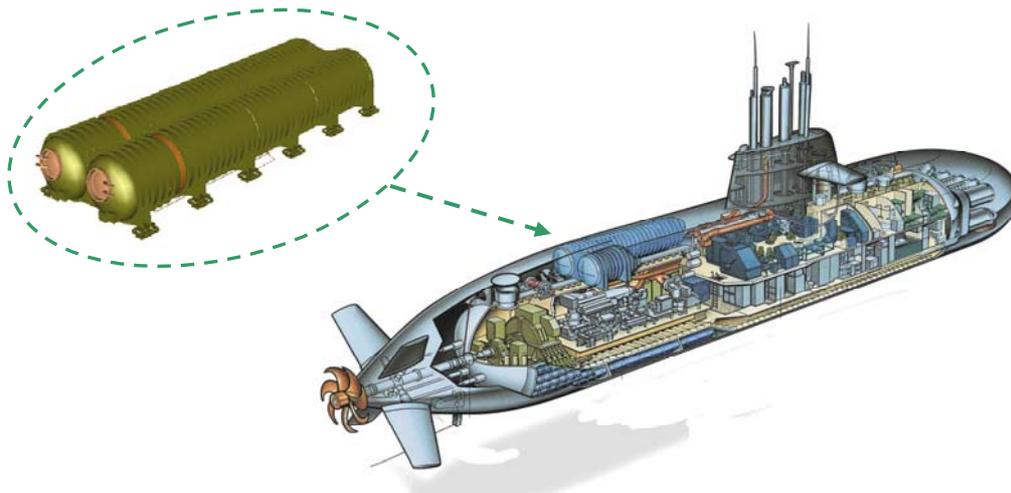


Abbildung 47 - Einbauort O<sub>2</sub>-Speicher [F1]

Die Fahrbereichsmaximierung des Brennstoffzellenantriebs erfordert Speicher mit relativ großen Abmessungen und demzufolge auch einem entsprechenden Gewicht. Der Einsatz von Titan für diese Tanks ist deshalb zur positiven Beeinflussung der Bootstabilität und zur deutlichen Verbesserung der Schockbeständigkeit sinnvoll, speziell für starr gelagerte Tanks im Außenschiff.

Bei der Dimensionierung dieser Komponenten ist jedoch zu beachten, dass externe Tanks aufgrund ihres großen Einflusses auf die Bootsverdrängung gemäß Druckkörpervorschrift zu dimensionieren sind, während die internen Tanks nur nach TÜV-Druckbehältervorschrift auszulegen sind.

**Berechnungsbeispiel:**

Für die Dimensionierung eines außendruckbelasteten, externen Speichers wird die folgende Geometrie verwendet:

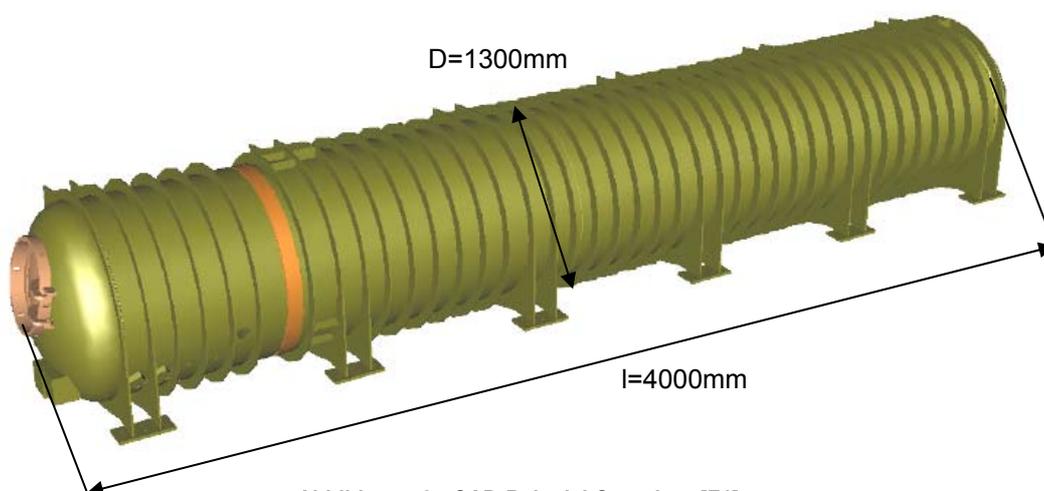


Abbildung 48 - CAD-Beispiel Container [F1]

Der Entwurf für einen Druckkörper mit Innenspannen erfolgt gemäß GL-Vorschrift [N10]. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle aufgelistet:

Tabelle 23 - Berechnung Sauerstoffspeicher

Merkmal	Behälter 1.3964	Behälter TiAl3V2,5
<b>Vorgaben</b>		
<b>Dehngrenze <math>R_{P0,2}</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	430	520
<b>Elastizitätsmodul [N/mm<sup>2</sup>]</b>	200000	105000
<b>Querkontraktionszahl <math>\nu</math></b>	0,3	0,3
<b>Dichte <math>\rho</math> [g/cm<sup>3</sup>]</b>	7,9	4,5
<b>Druckkörperaußendurchmesser [mm]</b>	1300	1300
<b>Druckkörperlänge [mm]</b>	4000	4000
<b>Außenhautstärke [mm]</b>	11	12
<b>Spantabstand [mm]</b>	170	180
<b>Steghöhe [mm]</b>	12	10
<b>Stegbreite [mm]</b>	28	30
<b>Gurthöhe [mm]</b>	16	17
<b>Gurtbreite [mm]</b>	28	30
<b>Verarbeitungsfaktor <math>\nu</math></b>  Gemäß [N16] berücksichtigt der Verarbeitungsfaktor $\nu$ Schwächungen in der Verarbeitung (Bsp. Schweißen). Der Faktor $\nu$ ist hier ein Schätzwert.	0,3	0,3
<b>Sicherheitsbeiwert gegen plastisches Beulen <math>S</math> gemäß [N17]</b>	1,6	1,7
<b>Dimensionierung für inneren Überdruck (Lastfall: Boot aufgetaucht)</b>		
<b>maximaler innerer Überdruck <math>p_i</math> [bar]</b>	10	10
<b>erforderliche Wandstärke bei innerem Überdruck <math>s_i</math> [mm]</b>  $s_i = \frac{D_a \cdot p}{20 \cdot \frac{R_{P0,2}}{S} \cdot \nu + p} + c_1 + c_2$ Formel 18 - Zylinderschale unter Innendruck [N18]	0,9 → Außenhautwandstärke OK!	0,7 → Außenhautwandstärke OK!
<b>Anmerkung: Die Korrosionszuschläge <math>c_1</math> und <math>c_2</math> sind vernachlässigbar.</b>		

<b>Dimensionierung bei äußerem Überdruck (Lastfall: Boot getaucht &amp; Speicher leer)</b>		
<b>maximaler äußerer Überdruck [bar]</b>	50	50
<b>maximal auftretende Spannung bei Betriebstauchtiefe [N/mm<sup>2</sup>]</b>	245	229
<b>maximale Verformung des Druckkörpers gem. [N10, Kap. 2, S.A-4] [mm]</b>	0,6	1,1
<b>kritische Tiefe für symmetrisches Beulen [m]</b>	5242	3311
<b>kritische Tiefe für asymmetrisches Beulen [m]</b>	1809	1202
<b>Gewicht Außenhaut [kg]</b>	1408	874
<b>Gewicht Spant [kg]</b>	24,3	14,3
<b>Spantenanzahl</b>	23	22
<b>Gesamtgewicht Druckkörperabschnitt [kg]</b>	1967	1189
<b>Gewicht im Vergleich zur 1.3964-Variante [%]</b>	100	61

**Fazit:**

Im Vergleich zu einem Sauerstofftank aus Stahl ist bei der Titanvariante eine Gewichtseinsparung von ca. 39 Prozent möglich. Bei zwei Tanks pro Boot ergibt sich somit eine Gesamtgewichtseinsparung von ca. 1556kg. Die Beeinflussung der Bootsstabilität ist gering und die Werkstoffsubstitution von Stahl durch Titan für die Sauerstoffspeicher ist deshalb nur bei gewichtskritischen Booten empfehlenswert.

**7.21 Wärmetauscher**

Der Einsatz von Titan in Wärmetauschern ist in der Meerestechnik bereits weit verbreitet - ob auf Plattformen, in chemischen Anlagen oder als Seewasserkühler auf Überwasserschiffen. Als Vorzugswerkstoff wird dabei der Reintitan Ti<sub>2</sub> aufgrund seiner ausgezeichneten Korrosionsbeständigkeit bei erhöhten Temperaturen, Umformbarkeit, Schweißbarkeit und Verfügbarkeit bei geringen Materialkosten verwendet. Im Vergleich zu sonst üblichen Kupfer-Nickel-Legierungen besitzt Titan jedoch einen verhältnismäßig kleinen Wärmeleitwert, so dass die Kontaktfläche bei einer Werkstoffsubstitution deutlich erhöht werden muss (Faktor 4). Dies bedeutet jedoch, dass der erforderliche Bauraum für die Seewasserkühler aus Titan deutlich

größer und somit der Einsatz auf militärischen Ubooten begrenzt ist. Auf Überwasserschiffen ist dieser Punkt mehr oder weniger irrelevant, da bei dieser Anwendung üblicherweise größere Bauräume zur Verfügung stehen.

Ein weiterer Nachteil von Titanwärmetauschern ist die hohe Biokompatibilität, die bei geringen Einsatzzeiten ein Zusetzen des Wärmetauschers durch Organismen ermöglicht. Mögliche Abhilfen sind entweder die Erhöhung der Einsatzzeiten oder die Oberflächenbehandlung der Rohr- bzw. Platteninnenseite.



Abbildung 49 - Rohrbündelwärmetauscher [ASE-Apparatebau GmbH]

### **7.22 Rohrleitungssysteme**

An Bord eines Schiffes gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen Rohrleitungssystemen. Dazu zählen beispielsweise Seewasser-, Hydraulik-, Trinkwasser-, Pneumatik- und Kraftstoffleitungen. In anderen Industriezweigen (Bsp. Luftfahrt, Offshore-Industrie, chemische Industrie) sind Rohrleitungssysteme aus Titanwerkstoffen bereits weitläufig verbreitet. Die entsprechenden Anwendungsbeispiele und Konstruktionsvorschriften sind in [P9] zu finden.



Abbildung 50 - Rohrleitungssystem am Hydraulikblock [F1]

In der folgenden Auflistung sind die Vor- und Nachteile von Rohrleitungssystemen aus Titan zu finden:

**Vorteile:**

- Gewichtersparnis im Vergleich zur Stahlausführung
- hohe Korrosionsbeständigkeit
- hohe Beständigkeit gegen abrasiven Verschleiß
- amagnetischer Werkstoff

**Nachteile:**

- eventuell höhere Material- + Fertigungskosten
- Auftreten von Kontaktkorrosion an Schnittstellen zu Rohrleitungen aus anderen Werkstoffen → nur Materialpaarungen mit gleichem Elektrodenpotenzial innerhalb eines Rohrleitungssystems anwendbar

### **7.22.1 Konstruktive Anmerkungen**

Bei der Verwendung von Rohrleitungssystemen aus Titanwerkstoffen sind folgende Konstruktionsempfehlungen zu berücksichtigen:

- Vermeidung von kontaktkorrosionsempfindlichen Materialpaarungen (Bsp. Rohr aus Titan, Verschraubung aus 1.4301) → optimal: Ausführung des kompletten Leitungssystems für eine Komponente aus dem gleichen Werkstoff
- Bei Schnittstellen zu Komponenten unedler Werkstoffe ist ein elektrisch nichtleitender Zwischenwerkstoff einzufügen (Bsp. Kunststoffbuchsen in DK-Durchführungen oder Gummieinlagen in Rohrhalterungen). Dadurch wird die elektrische Verbindung zu den unedlen Werkstoffen unterbrochen und Kontaktkorrosion in der Seeatmosphäre vermieden.

### **7.22.2 Seewasserführende Leitungssysteme**

Die Leitungssysteme dienen zum Transport von Seewasser innerhalb des Boots. Beispiele dafür sind die Leitungen zum Fluten und Lenzen von Trimm- und Regelzellen oder zur Speisung der Wärmetauscher. Aufgrund des dauerhaften Betriebs von Wärmetauschern (Laufzeit ca. 30 Jahre), auch während der Hafenziegezeiten (Ausnahme: Landversorgung) stellen diese Systeme extreme Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit der Rohrleitungen. Diese werden durch erhöhte Wassertemperaturen auf der Ablaufseite zusätzlich verstärkt. Aus diesem Grund ist der Einsatz von Rohrleitungen aus Titan empfehlenswert, um Korrosionsprobleme während der gesamten Lebensdauer zu vermeiden. Als kostengünstige und gut verfügbare Variante sind dabei Reintitanwerkstoffe wie beispielsweise Ti2 (ASTM-Grade 2) zu bevorzugen.

### **7.22.3 Hydraulikleitungssysteme**

Der Einsatz von Titanwerkstoffen in Hydraulikleitungssystemen ist in der Luftfahrt bereits erfolgreich durchgeführt worden. In diesem Fall dient dies zur Gewichtseinsparung. Der Einsatz von Titan für Ölhydraulikleitungen auf einem Schiff ist jedoch fraglich, weil der Gewichtsanteil der Leitungen im Vergleich zur Bootsmasse sehr gering bzw. Korrosionsprobleme am Innendurchmesser wegen der Ölschmierung nicht zu erwarten ist. Aus diesen Gründen ist die Effizienz für Hydraulikleitungen aus Titan zur Gewichtsreduzierung oder Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit sorgfältig zu prüfen.

Für die Leitungen eines Wasserhydrauliksystems ist der Einsatz von Titanwerkstoffen ebenfalls kritisch zu betrachten, da zur Vermeidung von Zufrieren der Leitungen Silikonöl eingesetzt wird, welches auch eine korrosionshemmende Wirkung besitzt.

Generell ist somit zu sagen, dass der Einsatz von Titan als Werkstoff für Hydraulikleitungen für jedes Projekt kritisch zu prüfen ist, weil bei dieser Anwendung die Korrosionsforderungen deutlich geringer sind, als beispielsweise bei den seewasserführenden Leitungen.

### **7.22.4 Pneumatikleitungssysteme**

An Bord eines Schiffes sind herkömmliche Pneumatiksysteme (Ausnahme: Hochdruck-Pressluftanlagen) im Vergleich zu den hydraulischen Systemen aufgrund der relativ geringen Leistungsdichte eher selten. Nach der Substitution der Stahlleitungen durch Titan ist deshalb keine deutliche Gewichtsreduzierung zu erwarten. Die Ölung der Druckluft bewirkt außerdem eine Verringerung der Korrosionsschutzanforderungen. Aus diesen Gründen ist wegen der erhöhten Material- und Fertigungskosten der Einsatz von Titanwerkstoffen für diese Anwendung für jedes Projekt kritisch zu betrachten.

### **7.22.5 Trinkwasserleitungssysteme**

Aufgrund der ausgezeichneten Biokompatibilität und der hohen Korrosionsbeständigkeit ist der Einsatz von Titanwerkstoffen bei trinkwasserführenden Systemen empfehlenswert. Die Anwendung ist jedoch angesichts der (wenn auch nur geringen) Mehrkosten nur sinnvoll, insofern die standardisierten Edelstahlleitungen Korrosionsschäden aufweisen. Wie auch bei den seewasserführenden Rohrleitungen sind Reintitanwerkstoffe wie beispielsweise Ti2 (ASTM-Grade 2) zu bevorzugen.

### **7.22.6 Fazit**

Nicht für alle Rohrleitungssysteme ist der Einsatz von Titanwerkstoffen generell empfehlenswert, da die erhöhten Material- und Fertigungskosten und die besonderen

Anforderungen an Materialpaarungen im Vergleich zu Stahlrohren relativ hoch sind. Der Einsatz ist deshalb für jedes Projekt speziell zu prüfen.

### 7.23 Abgasanlage

Die Abgasanlage dient zur Ableitung der Verbrennungsabgase in die Atmosphäre. Dabei können sehr hohe Temperaturen bis zu 450 °C auftreten, was in Verbindung mit dem Abgas und der Seeatmosphäre eine hochkorrosive Umgebung ergibt.

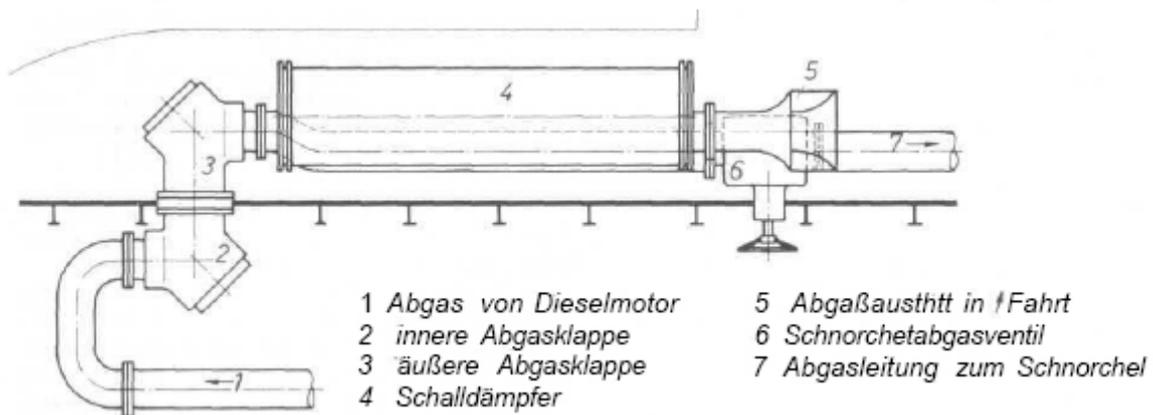


Abbildung 51 - Schema Diesellabgasanlage [P31, S.73]

Beim Einsatz von Stahlrohren zur Abgasführung tritt deswegen immer Korrosion in Form von Flächen-, und Spaltkorrosion auf. Die Anwendung von Titan zur Korrosionsminimierung ist somit ideal, was bereits in Kraftfahrzeugabgasanlagen erfolgreich umgesetzt wurde. Allerdings ist die Anwendung auf Bereiche unter 300°C zu beschränken, da sonst eine Oberflächenoxidation durch die erhöhte Gasaffinität auftritt. Für Bereiche über 300°C sind deshalb die hochtemperaturbeständigen Titan-Aluminide zu verwenden, die sich jedoch noch in der Entwicklung befinden.



Abbildung 52 - Porsche 911-GT2 [www.zcars.com, 17.06.2010]

Beim Einsatz von Titan sind folgende Punkte zu beachten:

- Einsatztemperatur < 300 - 400°C (je nach Legierung)
- Vermeidung einer galvanischen Kopplung zu Materialien mit geringerem Elektrodenpotenzial zur Verringerung des Risikos einer Kontaktkorrosion
- Vermeidung von Spalten

Weitere Vorteile von Titan sind der geringe Ausdehnungskoeffizient und die daraus resultierende geringe Ausdehnung bei den großen Bauteillängen und die geringere Wärmeabgabe durch die niedrige Wärmeleitfähigkeit. Als Vorzugswerkstoff sind bei geringen Temperaturen die Reintitanwerkstoffe und TiAl5Sn2,5 aufgrund der guten Beständigkeit bei erhöhten Temperaturen zu empfehlen.

### **7.24 Einrichtung und Stauung**

Die Einrichtung eines Uboots umfasst sämtliche Bereiche von der Integration bootseigener Systeme über die Anordnung der Wohn- und Wirtschaftsräume bis zur Unterbringung der notwendigen Staukasten.

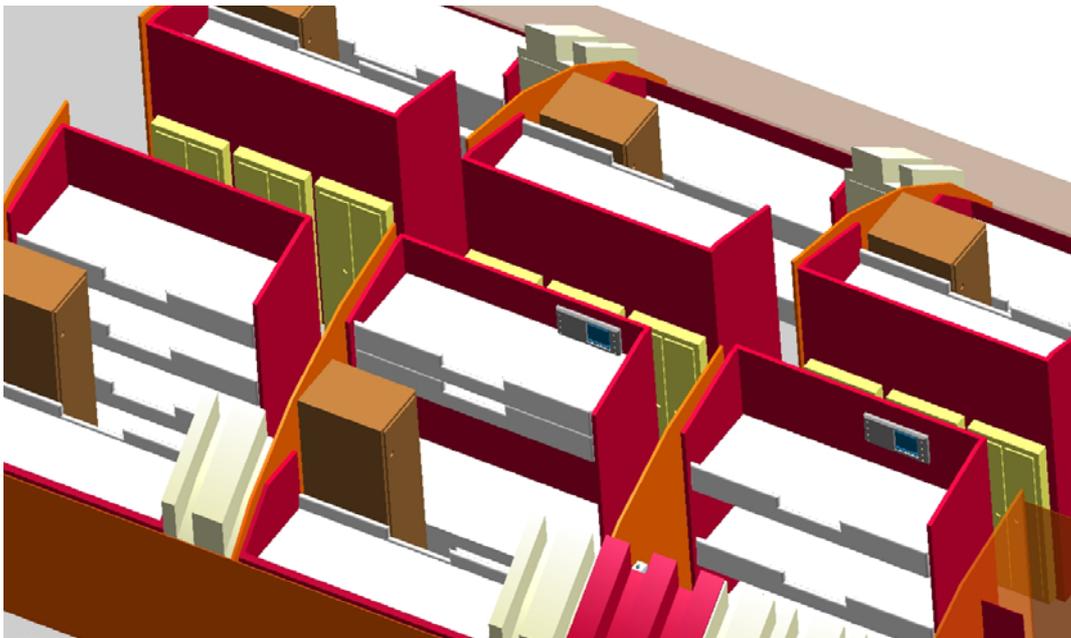


Abbildung 53 - Einrichtungsstudie Wohnraum [F1]

In der Einrichtung und in der Stauung werden derzeit vorwiegend beschichtete Aluminium-, Faserverbund-, Holz- und Kunststoffprofile verwendet. Festigkeitskritische Bauteile aus beschichtetem Stahl sind eher als Ausnahmen zu betrachten und würden bei der Substitution mit Titan keine nennenswerten Gewichtsvorteile bringen. Titan ist deshalb nur für Komponenten interessant, die entweder hohe Kräfte aufnehmen müssen oder freiliegende Funktionsflächen (Korrosionsbelastung) besitzen.

### 7.24.1 Kühlraum und Kombüse

Aufgrund der ausgezeichneten Biokompatibilität, der guten Lebensmittelkorrosionsbeständigkeit und der geringen Dichte eignen sich Titanwerkstoffe hervorragend für den Einsatz in hygienischen Bereichen wie beispielsweise der Kombüse oder dem Kühlraum. Als Vorzugswerkstoff sind die kostengünstigen Reintitan-Grade 3.7025 oder 3.7035 empfehlenswert, jedoch ist deren Einsatz im Vergleich zu den teilweise kostengünstigeren Edelstählen für jede Anwendung zu analysieren. Es kann somit keine allgemeingültige Empfehlung gegeben werden.



Abbildung 54 - Kombüse [F1]

### 7.24.2 Staukasten

Die Staukasten dienen zur Lagerung einer Vielzahl verschiedener Komponenten und sind wegen der Platzverhältnisse häufig an die vorhandene Umgebung speziell angepasst. Für diese Komponenten wird derzeit vorwiegend das leichtere, beschichtete Aluminium verwendet. Eine Substitution mit Titan ist durch die ohnehin schon sehr hohen Fertigungskosten angesichts der Spezialkonstruktion der Staukasten aus Aluminium nicht empfehlenswert.

### **7.25 Fazit**

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Einsatz von Titan auf Unterwasserfahrzeugen sowohl bei Kleinteilen (Federn) als auch im Großkomponentenbereich zum Teil deutliche technische Vorteile mit sich bringen kann und somit durchaus eine Alternative zu den etablierten Schiffbau- und hochlegierten Edelstählen darstellt. Weiterhin sind durch den Einsatz des hochkorrosionsbeständigen Leichtmetalls Titan mit den hohen dichtespezifischen Festigkeiten auch absolut neue Anwendungen möglich. Insofern jedoch für die technische Realisierung die Verwendung von Stahl möglich ist, erfordert jede Werkstoffuntersuchung eine Betrachtung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses für die jeweiligen Werkstoffe.



Abbildung 55 - Uboot KI. 214 [F1]

## 8 Druckkörper aus Titan

Der Werkstoff Titan findet bereits Anwendung im Bereich des Druckkörperbaus von Unterwasserfahrzeugen. In den Forschungstauchbooten „ALVIN“, „MIR“ und „SHINKAI“ werden bereits Druckkugeln aus dieser Werkstoffgruppe eingesetzt und in russischen Militärubooten (Bsp. MIKE-Klasse) werden ebenfalls Druckkörper aus Titan vermutet.



Abbildung 56 - Tauchboote SHINKAI + ALVIN [www.mbari.org, www.sstg.org 15.01.2010]

Der Einsatz von Druckkugeln im militärischen Ubootbau ist wegen der notwendigen Formgebung eines solchen Unterwasserfahrzeugs nur schwer möglich und wird deshalb zunächst nicht weiter betrachtet (Ausnahme Rettungskugel).

### 8.1 Aktueller Stand der Technik

Die Werkstoff- und Fertigungstechnik der mutmaßlichen sowjetischen Druckkörper aus Titan ist derzeit öffentlich rein spekulativ und somit nicht zugänglich. In Deutschland wurden jedoch bisher keine Uboot-Druckkörper aus dem Werkstoff Titan gefertigt. Demzufolge existieren weder technische Lieferbedingungen, die die Herstellung und Abnahme dieses Werkstoffs definieren, noch Vorschriften zu Bau und Erprobung von Titan-Druckkörpern seitens des Germanischen Lloyd oder des Bundesamts für Wehrtechnik und Beschaffung. Für die Einführung von Titan als Druckkörperwerkstoff ist deshalb zunächst die Definition von notwendigen Werkstoffanforderungen und Abnahmeprüfungen notwendig (siehe auch Kapitel „10 Teilprojekt: Werkstoffzulassung im Schiffbau“).

### 8.2 Anforderungen an Druckkörperwerkstoff

Aufgrund der derzeit noch nicht vorhandenen Normen für die Mindestanforderungen an Titanwerkstoffe für den Druckkörpereinsatz werden folgende Anforderungen in

Anlehnung an die bisherigen Stahl-Normen des BWB und des GL **vorläufig**<sup>2</sup> definiert:

- Bruchdehnung<sup>3</sup>:                     $\geq 11\%$  (aus Schockberechnungsvorschrift [F1])  
     $\geq 16\%$  [N10, Kap.2, S.4-2]  
     $\geq 16\%$  [N4, S.3-25]
- Kerbschlagarbeit<sup>4</sup>:                 $> 30\text{J}$  bei  $0^\circ\text{C}$  für  $s \leq 20\text{mm}$  [N10, Kap.2, S.4-2]  
     $> 30\text{J}$  bei  $-20^\circ\text{C}$  für  $s > 20 \leq 40\text{mm}$  [N10, Kap.2, S.4-2]  
     $> 55\text{J}$  bei  $20^\circ\text{C}$  [N4, S. 1-23]

Weiterhin werden folgende, wichtige Forderungen zur Optimierung der Druckkörperdimensionierung und -verarbeitung **vorläufig** aufgestellt:

- Dehngrenze:                             $> 450$  bis  $500$  MPa (Erfahrungswerte [F1])
- hohe Duktilität
- hohe Gleichmaßdehnung für Festigkeitsoptimierung im elastisch-plastischen Bereich
- Korrosionsbeständigkeit in Seewasser und -umgebung
- gute Verarbeitbarkeit und Schweißbarkeit (Beachtung der Bruchdehnung + Kerbschlagarbeit nach dem Schweißen)
- amagnetisch (je nach Bootsklasse)

Angesichts der hohen erforderlichen Bruchdehnung in Verbindung mit der hohen Kerbschlagarbeit ist die Verwendung von hochlegierten Titanwerkstoffen nicht möglich, da diese eine Bruchdehnung von  $< 10\%$  bzw. eine geringe Kerbschlagarbeit besitzen und somit die Sicherheitsreserven des Materials nicht ausreichend bzw. die Schockberechnungsverfahren nicht mehr anwendbar sind. Zum derzeitigen Stand der Technik ist demnach nur der Einsatz von Reintitanwerkstoffen (Ti 4), gering legierten Titanlegierungen (TiAl3V2,5) oder Speziallegierungen (TiAl4,5V3Mo2Fe2 oder Ti15-3-3-3) möglich. Aufgrund der hohen Materialkosten (ca. 80-120€/kg), der geringen Verfügbarkeit und des fehlenden Know-hows bei der Verarbeitung (vor allem beim Schweißen) ist zum aktuellen Stand der Technik die Verwendung von Speziallegierungen für Druckkörperanwendungen nicht empfehlenswert. Reintitanwerkstoffe hingegen besitzen eine ausgezeichnete Bruchdehnung, sind gut verfügbar und gut zu verarbeiten, jedoch sind die erzielbaren Festigkeiten sehr gering. Die optimale Lösung bieten somit mittelfeste  $\alpha+\beta$ -Legierungen, die sowohl gute Festig-

---

<sup>2</sup> Die vorläufige Definition wird aufgrund der noch nicht vorhandenen Prüfvorschriften für Titanwerkstoffe für Druckkörperanwendungen erstellt. Diese muss nach erfolgter Prüfung überarbeitet werden.

<sup>3</sup> im geschweißten und ungeschweißten Zustand

<sup>4</sup> (Charpy-V-Proben)

keitswerte als auch eine hohe Duktilität aufweisen. Als Vorzugswerkstoff wurde deshalb die Legierung TiAl3V2,5 (ASTM-grade 9) ausgewählt, die wegen der guten Verfügbarkeit, den hohen Festigkeiten und Bruchdehnungen zwischen 15 und 20% optimale Voraussetzungen für die Anwendung als Druckkörperwerkstoff besitzt. Zudem existieren von dieser Legierung bereits ausgiebige Erfahrungen durch den Einsatz im Flugzeugbau. In der folgenden Tabelle sind die mechanisch-technologischen Werte dieser Titanlegierung im Vergleich mit den im Ubootbau üblichen Druckkörperstählen aufgelistet:

Tabelle 24 - Druckkörperwerkstoffe

	<b>TiAl3V2,5<sup>5</sup></b> <b>(3.7195)</b>	<b>X2CrNiMnMoNb 21 16 5 3</b> <b>(1.3964)</b>	<b>HY80</b> <b>(1.6780)</b>
<b>Dichte [g/cm<sup>3</sup>]</b>	4,5	7,91	7,85
<b>Dehngrenze[N/mm<sup>2</sup>]</b>	520-640	430	550-700
<b>Zugfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>]</b>	620-700	750-950	770
<b>Bruchdehnung [%]</b>	15-20	35	19
<b>Stauchgrenze[N/mm<sup>2</sup>]</b>	650-800	>430	>550
<b>Kerbschlagarbeit [J]</b>	50-100	>70	>50-80
<b>Dauerfestigkeit[N/mm<sup>2</sup>]</b>	320	250	330
<b>Querkontraktionszahl</b>	0,3	0,3	0,3
<b>E-Modul [GPa]</b>	95-105	195	200

Aufgrund der relativ hohen Gewichtsvorteile gegenüber Stahl und vergleichbarer Festigkeiten sind Titanwerkstoffe sehr interessant als Druckkörpermaterial. Dadurch lassen sich drei Optimierungsmöglichkeiten im Vergleich zu den bisherigen Stahl-druckkörpern realisieren:

1. Bei gleicher Tauchtiefe, d.h. gleicher Beanspruchung des Materials, kann das Gesamtgewicht des Druckkörpers verringert werden. Damit ist es möglich, die Stabilität des Bootes durch gezielte Positionierung des Volumen- und Gewichtsschwerpunkts zu optimieren.
2. Nach der Gewichtsreduzierung des Druckkörpers bei gleicher Tauchtiefe können schwerere Einbauten installiert werden.

---

<sup>5</sup> Zum aktuellen Stand der Technik existiert kein Werkstoffleistungsblatt für diesen Werkstoff. Die Werkstoffparameter wurden deshalb Abnahmezertifikaten von dickwandigen Titanblechen entnommen und können demzufolge schwanken.

3. Bei gleichem Gewicht zu den herkömmlichen Stahldruckkörpern ist eine Verstärkung des Druckkörpers bei Verwendung von Titanwerkstoffen möglich. Dadurch kann die Tauchtiefe vergrößert werden.

### **8.3 Werkstoffkombination von Titan und Stahl**

Eine Werkstoffkombination von Titan mit Stahl zur Optimierung der Druckkörpereigenschaften wäre ideal: So könnte beispielsweise Stahl als Spantwerkstoff wegen des hohen E-Moduls die Verformung reduzieren und Titan als Außenhautwerkstoff das Gewicht optimieren. Druckkörper werden zum aktuellen Stand der Technik jedoch geschweißt und daher ist diese Kombination nicht empfehlenswert, da sich Titanwerkstoffe mit herkömmlichen Schmelzschweißverfahren nicht mit Stahl kombinieren lassen. Der Grund dafür ist, dass sich die Schmelzen nicht direkt verbinden (siehe Anhang). Dies wäre nur mit einem Zwischenwerkstoff (Bsp. Vanadium) möglich, was wiederum den Konstruktions- und Arbeitsaufwand und somit die Produktionskosten deutlich erhöht.

**Eine Kombination der Werkstoffe Stahl und Titan wird deshalb zum derzeitigen Stand der Technik nicht empfohlen - der Druckkörper inklusive Spanten sollte somit entweder komplett aus Titan oder aus Stahl gefertigt werden.**

### **8.4 Druckkörperdimensionierung**

Wie bereits erwähnt sind die derzeit verfügbaren Berechnungsvorschriften des Bundesamts für Wehrtechnik und Beschaffung und des Germanischen Lloyds auf Stahlwerkstoffe optimiert. Die Anwendung auf andere Werkstoffklassen ist durch die unterschiedlichen Werkstoffparameter und der damit verbundenen Abminderungsfaktoren in den Berechnungen nur begrenzt möglich.

Im Rahmen der Untersuchungen zur Anwendung von Titan im Schiffbau wird deswegen von der Howaldtswerke-Deutsche Werft GmbH ein auf finiten Elementen basierendes Dimensionierungs- und Optimierungsverfahren für Druckkörper aus Titanwerkstoffen entwickelt. Weiterhin müssen festigkeitsrelevante Werkstofffaktoren von Titan ermittelt werden, die in Kombination mit den Berechnungsvorschriften die Grundlage für eine Druckkörperdimensionierung bilden.

### 8.5 Berechnungsbeispiel

Aufgrund der derzeit fehlenden Dimensionierungsvorschriften wird als Grundlage für dieses Beispiel ein fiktiver, zylindrischer Druckkörperabschnitt gemäß den Richtlinien des Germanischen Lloyds [N10, Kap. I-5-2] mit folgenden Anforderungen analytisch berechnet:

- Druckkörperaußendurchmesser: 5000mm
- Berechnungstauchtiefe: 250m
- Länge zylindrischer Teil: 5000mm

Dabei ist zu beachten, dass weder eine fertigungsbedingte Vordeformationen, noch werkstoffspezifische Abminderungsfaktoren berücksichtigt werden. Insgesamt werden folgende 4 Varianten miteinander verglichen:

1. Basis: Druckkörper aus HY80
2. Vergleichswerkstoff 1.3964, gleiche Tauchtiefe wie 1
3. Vergleichswerkstoff TiAl3V2,5, gleiche Tauchtiefe wie 1
4. Vergleichswerkstoff TiAl3V2,5, gleiches Gewicht wie 1

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in folgender Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 25 - Berechnungsbeispiel Druckkörper

Merkmal	Druckkörper 15NiCrMo10-6 (HY80, 1.6780)	Druckkörper X2CrNiMnMoNb 21 16 5 3 (1.3964)	Druckkörper TiAl3V2,5 (3.7195) gleiche Tauchtiefe	Druckkörper TiAl3V2,5 (3.7195) gleiches Gewicht
<b>Vorgaben</b>				
<b>Nenntauchtiefe [m]</b>	250			390
<b>Sicherheitsfaktoren</b>	gemäß GL-Vorschrift [N10, Kap. 2, S.5-7]			
<b>Druckkörper- außendurchmesser [mm]</b>	5000			
<b>Druckkörperlänge [mm]</b>	5000			
<b>Außenhautstärke[mm]</b>	21	21	22	32
<b>Spantabstand[mm]</b>	380	350	270	270
<b>Steghöhe[mm]</b>	65	60	60	70
<b>Stegbreite[mm]</b>	20	26	22	30
<b>Gurthöhe[mm]</b>	20	25	22	40
<b>Gurtbreite[mm]</b>	50	50	50	50
<b>Elastizitätsmodul [N/mm<sup>2</sup>]</b>	200000	198000	105000	105000

## 8 Druckkörper aus Titan

<b>Berechnungen</b>				
<i>maximal auftretende Spannung in der Zylinderschale bei Betriebstauchtiefe [N/mm<sup>2</sup>]</i>	258	247	227	229
<i>maximale Verformung des Druckkörpers bei Betriebstauchtiefe [mm]</i>	2,6	2,4	4,2	4,2
<i>kritische Tiefe für symmetrisches Beulen [m]</i>	1314	1381	1117	3452
<i>kritische Tiefe für asymmetrisches Beulen [m]</i>	652	743	578	2960
<b>Zusammenfassung</b>				
<i>Gewicht Außenhaut [kg]</i>	12811	12811	7741	11237
<i>Gewicht Spant[kg]</i>	274	335	158	279
<i>Spantenanzahl</i>	13	14	18	18
<i>Gesamtgewicht Druckkörperabschnitt [kg]</i>	16369	17496	10584	16258
<i>Gewicht im Vergleich zur HY80-Variante[%]</i>	100	107	65	99
<i>Tauchtiefe im Vergleich zur HY80-Variante [%]</i>	100	100	100	156

Dieses Berechnungsbeispiel zeigt, dass der Einsatz von Titan wegen den hohen Festigkeiten bei gleichzeitig geringem Gewicht ein großes Potenzial hinsichtlich Gewichtsminimierung oder Tauchtiefenvergrößerung besitzt. So kann auf Basis einer Dimensionierung gemäß Germanischem Lloyd das Gewicht bei gleicher Tauchtiefe im Vergleich zur HY80-Variante um 35% reduziert bzw. die Tauchtiefe bei gleichem Gewicht um ca. 56% vergrößert werden. Zu beachten ist dabei jedoch die höhere Einschnürung des Druckkörpers im Vergleich zu den Stahlvarianten.

### **Fazit:**

Auf Grund der geringen Dichte des Titans bei hohen Festigkeiten sind enorme Gewichtseinsparungen möglich. Allerdings ist bei diesem Berechnungsbeispiel die Auslegung als ziviles Tauchboot zu berücksichtigen. Bei den größeren militärischen Ubooten gelten andere Rahmenbedingungen (Bsp. Schockbeständigkeit, Unrundheit des Druckkörpers), die eine Anpassung der Berechnungsverfahren erfordern und deutliche Auswirkungen auf das Ergebnis besitzen.

## 8.6 Signaturen

In diesem Teilkapitel werden die Einflüsse eines Druckkörpers auf die Signaturen des Uboots analysiert. Der Begriff „Signatur“ kennzeichnet dabei alle Merkmale, die ein Uboot für die Aufklärung sichtbar machen.

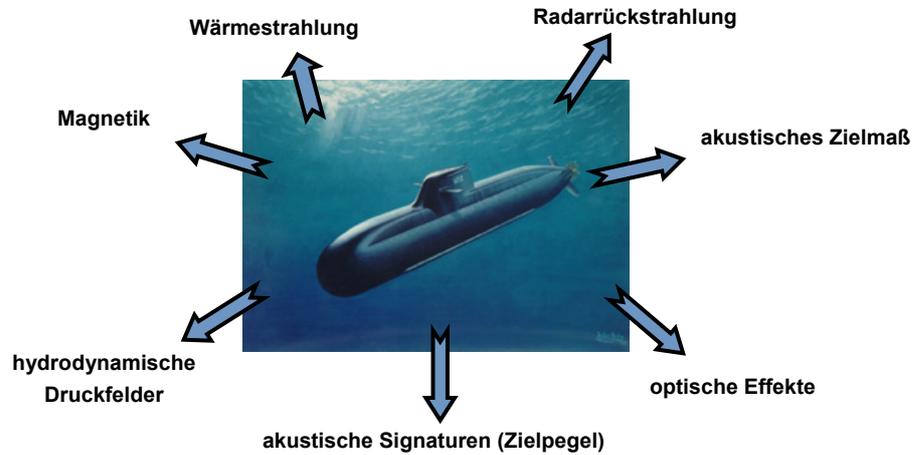


Abbildung 57 - Übersicht der Signaturen

Sowohl die hydrodynamischen Druckfelder als auch die optischen Effekte sind werkstoffunabhängige Signaturen und werden in den folgenden Punkten deshalb nicht betrachtet.

### 8.6.1 Magnetik

Die Magnetik eines Uboots besitzt erheblichen Einfluss auf dessen Entdeckbarkeit. Selbst kleinste Magnetfelder können durch Aufklärungssysteme geortet werden.

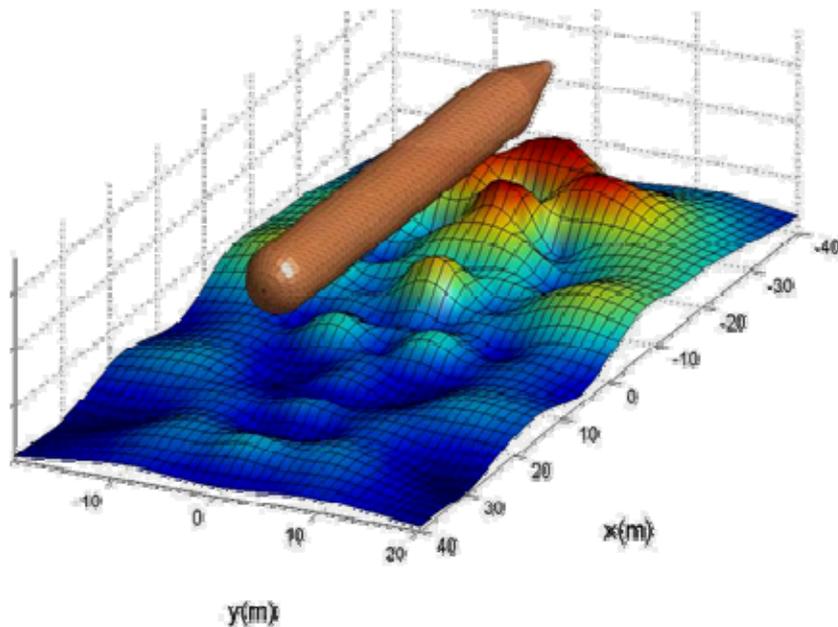


Abbildung 58 - Beeinflussung des Erdmagnetfelds [F1]

Aufgrund der ausgezeichneten amagnetischen Eigenschaften sind Druckkörper aus Titanwerkstoffen somit bestens für den Einsatz im Militärschiffbau geeignet. Auch die Bearbeitung dieses Werkstoffs bewirkt keine Magnetisierung, da Titan und dessen Legierungen größtenteils keine ferritischen Anteile besitzen. Der gesamte Druckkörper ist demnach nicht magnetisierbar, er bewirkt jedoch auch keine Abschirmung der innen liegenden Komponenten, da sich deren Magnetfeldlinien nicht im Druckkörper schließen. Demzufolge werden die magnetischen Signaturen der Boote durch die innen liegenden Komponenten (Bsp. elektrische Antriebe) beeinflusst. Als Richtwerte für die zulässigen magnetischen Feldstärken sind deshalb die Spezifikationen für Boote aus amagnetischem Stahl zu verwenden.

### 8.6.2 Zielmaß

Das akustische Zielmaß eines Uboots kennzeichnet das Verhalten einer Struktur auf Schallwellen einer aktiven Sonaranlage.

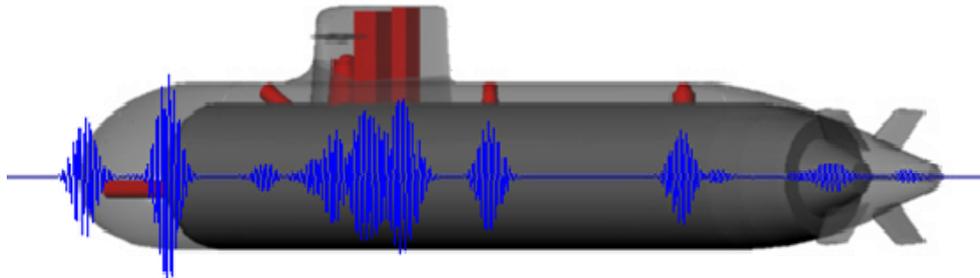


Abbildung 59 - Beispiel für Zielmaß [F1]

Das Frequenzspektrum von aktiven Sonaranlagen liegt derzeit im Bereich von 800 bis 1000Hz und deshalb tragen die im Vergleich zu den großen Wellenlängen verhältnismäßig dünnen Außenhautstärken kaum zur Dämpfung bzw. Absorption dieser Schallwellen bei. Die Schallreflexion wird demnach maßgeblich durch die Mediengrenze Wasser-Luft bestimmt und kann nur mittels spezieller, dickwandiger Beschichtungen (Bsp. Fliesen) mit hohen Absorptionskoeffizienten oder durch eine schallablenkende Geometrie verändert werden. In dem folgenden Diagramm ist der Einfluss des Werkstoffs auf die Schallreflexion einer senkrecht auf einer Platte einfallenden Welle in Abhängigkeit von deren Frequenz dargestellt:

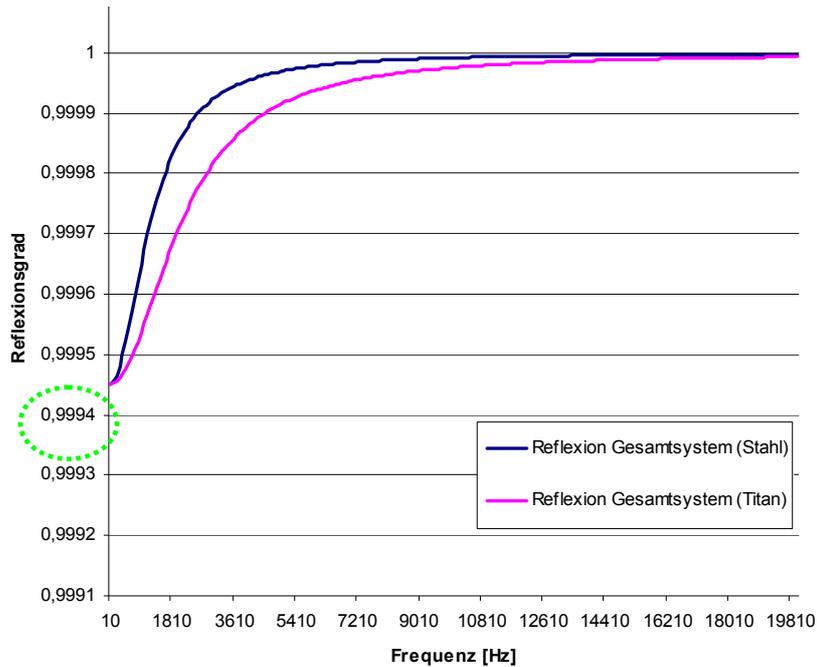


Abbildung 60 - Diagramm Reflexionsgrad für eine senkrecht auftreffenden Schallwelle [F1]

In diesem Diagramm ist zu sehen, dass der Reflexionsgrad mittels Werkstoffsubstitution kaum verändert wurde (Unterschied im 1/10000-Bereich) und somit praktisch keine Bedeutung für das Zielmaß besitzt.

### 8.6.3 Zielpegel

Als Zielpegel werden alle durch das Uboot und dessen Komponenten selbstverursachte Schallemissionen bezeichnet. Genau wie beim Zielmaß unterscheiden sich die Körperschalltransmissionseigenschaften von Stahl und Titan kaum voneinander, so dass durch die Werkstoffsubstitution keine nennenswerte Änderung des Zielpegels erfolgt.

### 8.6.4 Wärmestrahlung

Die Signaturen infolge der Wärmeabgabe sind vor allem bei Überwasserfahrt oder auf Seerohrtiefe kritisch. Der Werkstofffaktor des Druckkörpers hat jedoch kaum Auswirkungen auf die Verringerung der Infrarotsignatur, da die der Wärmeleitkoeffizient der einzelnen Metalle nur geringfügig variiert. Eine effektive Reduzierung kann deshalb nur mittels zusätzlicher Isolierung innenbords oder eine Verkleidung außenbords erfolgen.

### 8.6.5 Radarrückstrahlung

Die Radarrückstrahlung eines Objekts wird ebenfalls durch die Konturen und die Werkstoffauswahl bestimmt. Aufgrund der geringen Absorptionsfähigkeit der metallischen Werkstoffe ist auch bei dieser Signatur der Unterschied zwischen Stahl- und Titanwerkstoffen nur minimal (siehe Zielmaß). Die Stealth-Ausführung von

Turmbauteilen oder absorbierende Beschichtungen hingegen sind effektive Methoden zur Vermeidung von Radarrückstrahlungen.



Abbildung 61 - VISBY-Klasse [F1]

### **8.6.6 Zusammenfassung Signaturen**

Zusammenfassend besitzt die Werkstoffsubstitution von Stahl mit Titan kaum einen Einfluss auf die Signaturen eines Uboots. Lediglich die Magnetik wird maßgeblich durch die amagnetische Eigenschaft von Titan verändert. Allerdings steigen dabei auch die Anforderungen an die innen liegenden Komponenten wegen der fehlenden magnetischen Abschirmung des Druckkörpers, ähnlich wie bei Booten aus amagnetischen Edelstählen.

### **8.7 Fazit**

Die Ausführung von kompletten Druckkörpern aus Titan besitzt ein enormes Potenzial hinsichtlich Gewichtsminimierung oder Tauchtiefenerhöhung. Allerdings ist sowohl die Anpassung der Fertigungsmöglichkeiten als auch die entsprechende Normierung erforderlich. Außerdem sind die Kosten für diese Investitionen und die Fertigung eines Druckkörpers sehr hoch, so dass ein mittelfristiger Bau von kompletten Druckkörpern aus Titan für militärische Unterwasserfahrzeuge sehr unwahrscheinlich ist.

## 9 Teilprojekt: Laserschweißverfahren für Titanwerkstoffe

Das Schweißen ist zum derzeitigen Stand der Technik ein essentieller Bestandteil des modernen Schiffbaus, sowohl Über- als auch Unterwasser. Die Entwicklung eines modernen und effektiven Schweißverfahrens ist somit unbedingt notwendig für die Einführung von neuen Werkstoffen. In diesem Kapitel wird das Grundlagenforschungsvorhaben zwischen der Howaldtswerke-Deutsche Werft GmbH und der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung zur Ertüchtigung der Laserschweißtechnik für das Dickblechschweißen von Titanwerkstoffen beschrieben (siehe auch Anhang). Diese Untersuchungen bilden die Basis für die Eignungsuntersuchungen zur Zulassung von geschweißten Titanblechen zum Druckkörperwerkstoff.

### 9.1 Ausgangssituation

Das Verschweißen von dicken Titanblechen war bislang nur durch das extrem teure, unflexible Elektronenstrahlschweißen oder mittels aufwendigen und langwierigen Handschweißverfahren möglich. Durch die neuen Prozesstechnologien und der hohen Stahlleistungen ist derzeit auch das Laserschweißen mittels Faserlaser aufgrund folgender Vorteile besonders interessant für Spezialanwendungen im Schiffbau:

- hohe Materialstärken schweißbar
  - hohe Schweißgeschwindigkeit
  - kein Vakuum wie beim Elektronenstrahlschweißen sondern Schutzgasabschirmung notwendig → nahezu flexibler Einsatzort
  - flexible Anordnung der Strahlquelle durch Lichtleitfaserverlegung
  - flexible Strahlführung durch robotergeführten Schweißkopf
- } hohe Produktivität

Durch die flexible Laserstrahlführung (Einsatz einer Lichtleitfaser), der guten Materialeigenschaften in der Wärmeeinflusszone und der hohen Schweißleistung wird nun das Laserschweißverfahren im Hinblick auf den Einsatz im Ubootbau untersucht und bewertet werden.

### 9.2 Ziele des Entwicklungsvorhabens

Zur Ertüchtigung des Laserstrahl- und Laserstrahlhybridschweißens für dickwandige Titanbleche wurde ein Forschungs- und Entwicklungsvorhaben in Kooperation mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung in Berlin initialisiert. Dabei sollen das Verfahren für den Einsatz der Werkstoffe TiAl3V2,5 und TiV15Cr3Al3Sn3 in die Blechstärken 15,20 und 40mm hinsichtlich der Eignung für den Ubootbau untersucht und bewertet werden.

### 9.3 Schweißverfahren

Die Schweißuntersuchungen wurden größtenteils bei der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Berlin durchgeführt. Bei höherer Laserleistung (ab 20kW) wurde zusätzlich die IPG Laser GmbH in Burbach beauftragt. Dabei wurde jeweils eine Faserlaserschweißanlage mit folgendem Aufbau verwendet:

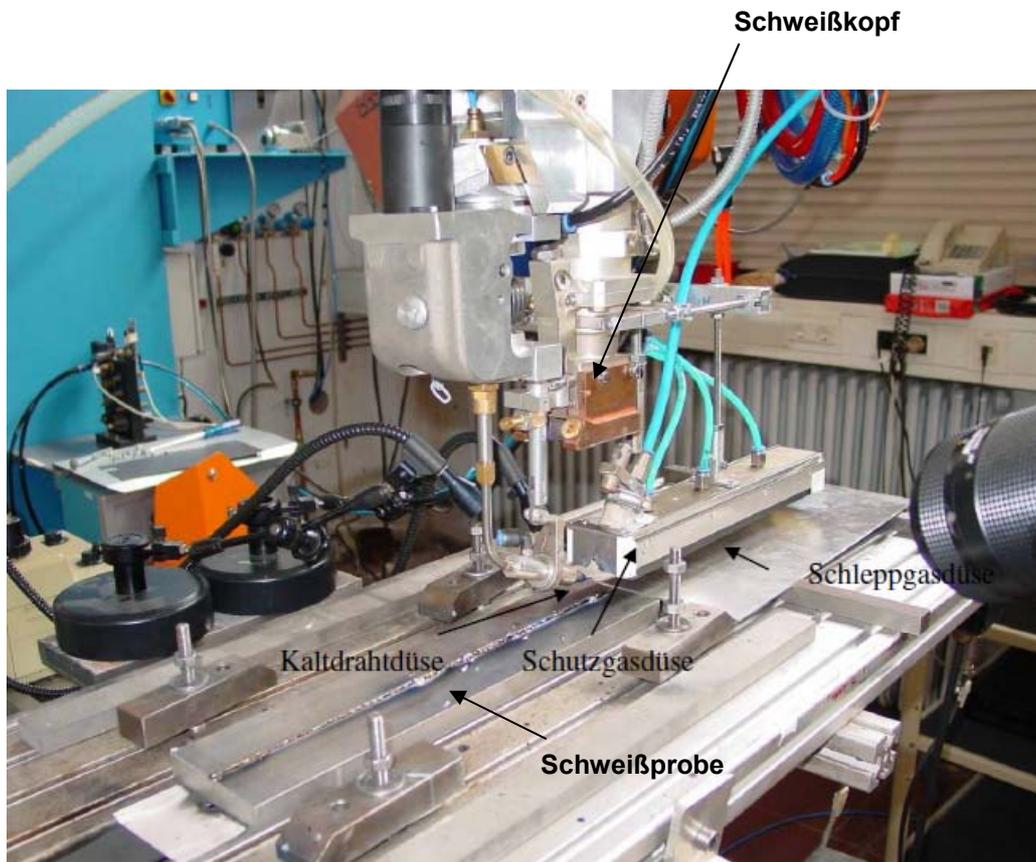


Abbildung 62 - Versuchsaufbau Laserschweißanlage [F5]

Folgende Schweißverfahren wurden unter Schutzgasatmosphäre (Argon mit Reinheitsgrad 5.0) auf dieser Anlage erprobt und ausgewertet:

- Laserschweißen ohne Zusatzdraht
- Laserschweißen mit Zusatzdraht (Kaltdraht aus Grundwerkstoff)
- Laser-MIG-Hybridschweißen

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen an den Titanproben aus TiAl3V2,5 bzw. TiV15Cr3Al3Sn3 mit einer Länge von je 350mm sind im folgenden Kapitel aufgeführt.

### 9.4 Untersuchungsergebnisse

Dieses Forschungsprojekt brachte umfassende Ergebnisse im Bereich Laserschweißtechnik von Titan. Davon sind die wichtigsten in folgenden Punkten zusammengefasst:

- Im Vergleich zu Stahlwerkstoffen gleicher Materialstärke war bei diesen Titanlegierungen eine höhere Laserleistung für ein sicheres Durchschweißen erforderlich.

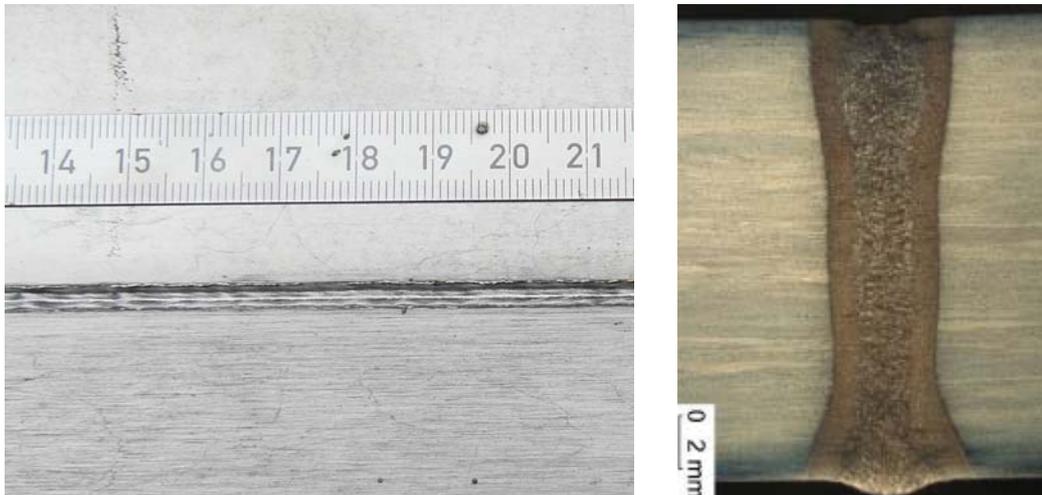


Abbildung 63 - Laserschweißnaht-Oberseite + Mikroschliff [F5]

- Im Vergleich zum WIG-Schweißen wurde bei den untersuchten Blechstärken von >10mm eine sehr hohe Produktivität erreicht. Für das WIG-Schweißen beträgt die Geschwindigkeit ca. 0,3m/min/Lage. Das Laserschweißen wurde mit weit über 1m/min durchgeführt, so dass die Produktivität beim Dickblechschweißen ca. 30x höher ist als bei dem WIG-Verfahren.
- Das Laserstrahlschweißen erfordert für optimale Ergebnisse einen technischen Nullspalt. Ein minimaler Spalt kann durch Schweißen mit Zusatzdraht aufgefüllt werden. Für das Verschweißen von größeren Spalten sind weitere Untersuchungen notwendig.
- Die Proben mit mittels Wasserstrahl geschnittenen Kanten wiesen im Vergleich zu gefrästen Schweißnahtvorbereitungen einen deutlich stabileren Prozess und somit ein besseres Schweißergebnis auf. Der Grund dafür liegt höchstwahrscheinlich in der Kontamination der Schnittkanten durch das Kühlmittel bei der Bearbeitung. Dieses Kühlmittel verdampft und bildet Poren in der Schweißnaht. Selbst das Beizen konnte keine Verbesserung bewirken.

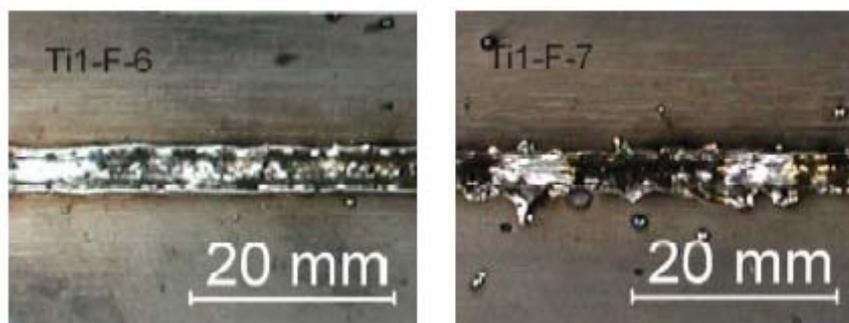


Abbildung 64 - Einfluss der Schnittkante: links:Wasserstrahl, rechts: gefräst [F5]

Auch in diesem Punkt besteht noch Bedarf für weitere Untersuchungen zur Er-  
tüchtigung eines industriell anwendbaren Verfahrens.

- Eine effektive Schutzgasabdeckung kann durch eine Formier- und eine Schleppgasdüse realisiert werden. Die gemessene Härtezunahme im Querschliff der Wärmeeinflusszone infolge der Gasaufnahme war somit sehr gering.

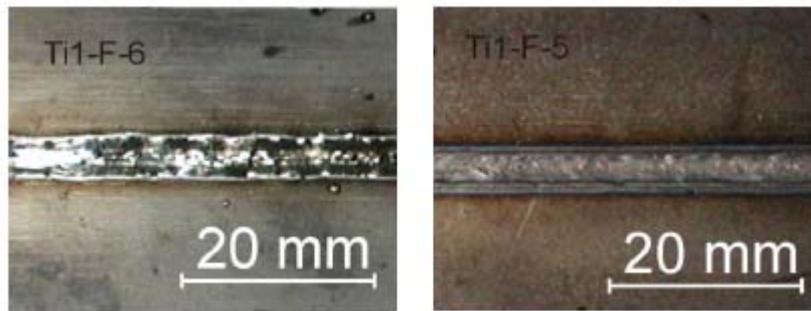


Abbildung 65 - Schweißergebnisse - links mit, rechts ohne Schutzgasabdeckung [F5]

- Ein sicheres Schweißen von 40 mm Blechen mit kleinen Laserleistungen erscheint aus heutiger Sicht als unrealistisch, da das Blindschweißen eines I-Stoßes nach dem Lage-Gegenlage-Prinzip bei der ersten Lage zu Schweißunregelmäßigkeiten im Schweißgrund führt. Hierfür sind weitere Untersuchungen mit deutlich höheren Laserleistungen von ca. 50-60 kW notwendig.
- Typische Schweißunregelmäßigkeiten beim Laserstrahlschweißen von dicken Titanblechen sind Poren und Lunker der sowohl unterkritischen als auch überkritischen Größe, die sehr vereinzelt in der Schweißnaht auftreten. Ein entsprechendes Reparaturschweißkonzept für die Beseitigung solcher Fehler befindet sich noch in der Entwicklung.

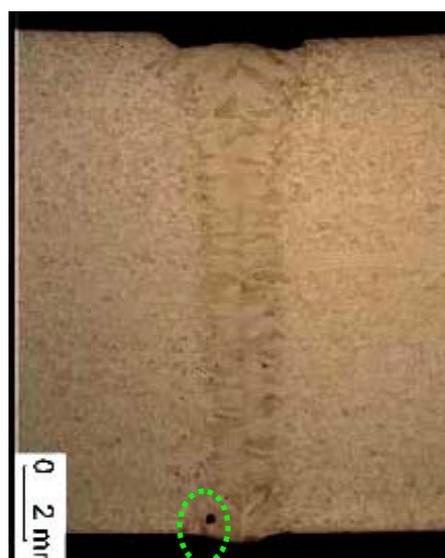


Abbildung 66 - Porenbildung [F5]

- Die erzielten mechanisch-technologischen Kennwerte der Schweißverbindung liefern wegen der kurzen Prozesszeit exzellente Ergebnisse im Bereich der Mikrohärtemessung, der Zugfestigkeiten und der Kerbschlagarbeitswerte.

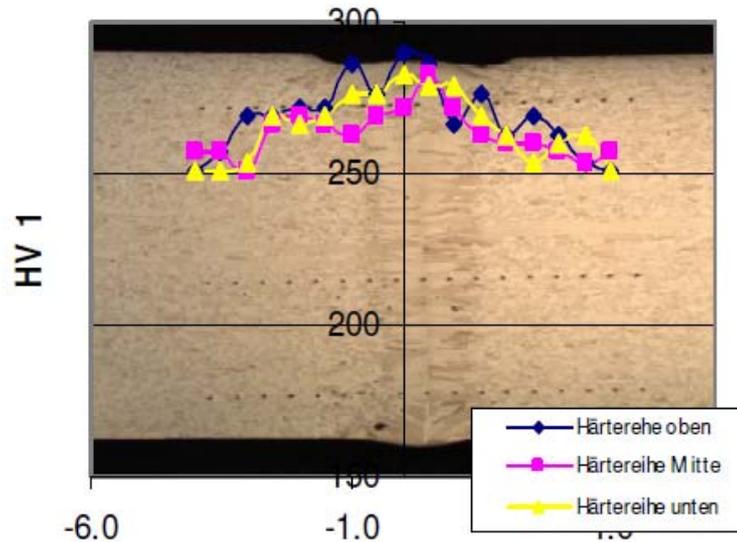


Abbildung 67 - Mikrohärteverteilung in WEZ [F5]

- Eine Kosmetiklage in Form einer WIG-Decknaht ist notwendig für das Füllen der prozessbedingten Nahtunterwölbung und eventueller Wurzelkerben. Bezüglich der Festigkeit hat diese Decklage aufgrund der geringen Eindringtiefe keinen Einfluss (bei großen Materialstärken).

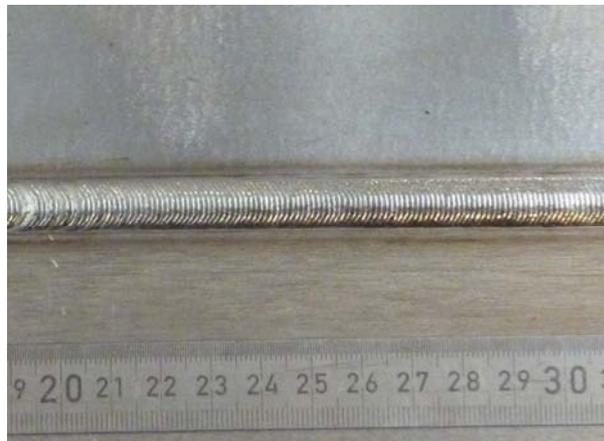


Abbildung 68 - WIG-Decklage [F5]

Im Folgenden sind die Zugversuche<sup>6</sup> an geschweißten Proben aus TiAl3V2,5 abgebildet:

<sup>6</sup> absolute Werte aus Gründen der Sicherheitseinstufung entfernt

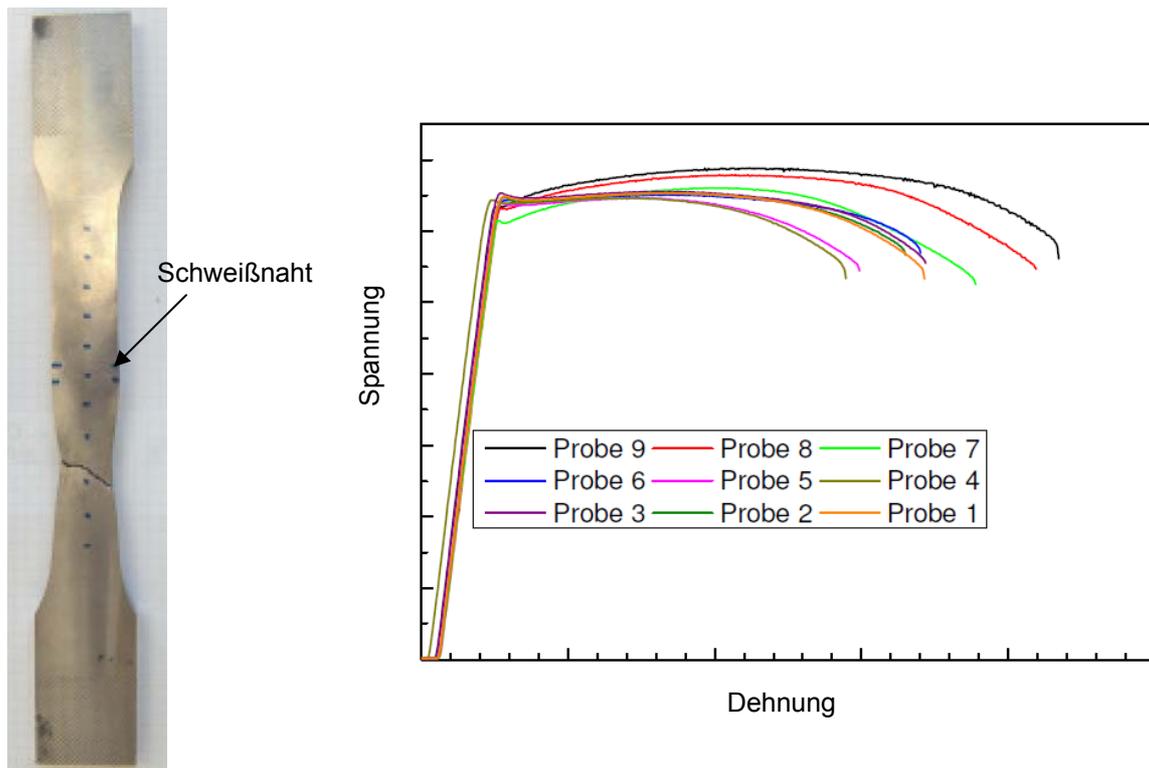


Abbildung 69 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm [F5]

Es ist zu erkennen, dass die Dehngrenzen im Bereich der Festigkeiten des Grundmaterials liegen. Die Abweichungen der Bruchdehnung lassen sich dabei auf unterschiedliche Texturen des Grundmaterials zurückführen. Bemerkenswert ist, dass keine Zugprobe bei dieser Belastung in der Wärmeeinflusszone gerissen ist. Es ergibt sich somit ein Schweißnahtfaktor von 1, d.h. die Schweißnaht ergibt keine Schwächung des Materials. Diese Aussage konnte bisher nur durch die Zugprüfung bestätigt werden. Weitere Prüfungen der mechanischen Eigenschaften erfolgen im Rahmen der Zulassungsuntersuchungen von Titan zum Druckkörperwerkstoff (Bsp. Kerbschlagarbeit). Erst nach Abschluss aller Prüfungen ist eine Aussage zum Verhalten des geschweißten Werkstoffs möglich.

### **9.5 Eignung für den Ubootbau**

Dieses hochproduktive Schweißverfahren eignet sich vor allem für Anwendungen mit hoher Schweißleistung und standardisierten Schweißnähten. Weiterhin sollte dieser Prozess für besonders kritische Schweißnähte verwendet werden, bei dem die Optimierung der mechanisch-technologischen Eigenschaften aufgrund der prozessbedingten, geringen Wärmeeinbringung erforderlich ist. Allerdings ist dabei der erhöhte Aufwand an Prozesseinrichtung und Kantenvorbereitung zu betrachten, der eine Weiterführung dieses Entwicklungsvorhabens erfordert, um dieses Schweißverfahren in der Serie anwenden zu können. Besonders bei großen Komponenten mit den entsprechenden Formtoleranzen ist die exakte Kantenvorbereitung ein entschei-

dendes Kriterium für die Anwendbarkeit, so dass auch dafür eine Weiterentwicklung notwendig ist.

### **9.6 Eignung für den zivilen Schiffbau**

Für den zivilen Schiffbau ist das Laserschweißverfahren nur für Spezialanwendungen oder standardisierte Komponenten wirtschaftlich. Ein erfolgreiches Beispiel dafür ist das Schweißen von Segmenten für den Bau von Kreuzfahrtschiffen auf der Meyer-Werft in Papenburg. Für die Fertigung von Schiffsrümpfen bei Überwasserfahrzeugen ist dieses Verfahren wegen der großen Formtoleranzen der Bleche nicht empfehlenswert.

### **9.7 Ausblick**

Das Dickblechschweißen von Titan mittels Laserstrahlverfahren ist ein absolut neues Verfahren. Die bisherige Grundlagenforschung erfordert eine Weiterführung zur Erlangung der industriellen Verwendbarkeit dieses Prozesses. Dafür sind in Zukunft noch folgende Punkte zu untersuchen:

- Optimierung der Schweißparameter zur Verringerung von Unregelmäßigkeiten in der Wärmeeinflusszone und zur Optimierung der Schweißnahtgeometrie
- Vergrößerung von Spalt und Kantenversatz zur Verringerung der Anforderungen an Schweißnahtvorbereitung und zur Erhöhung der Schweißnahtqualität
- Ertüchtigung aller Schweißpositionen (steigend, fallend...)
- Optimierung der Parameter für Beginn und Ende der Schweißnaht zur Stabilisierung des Prozesses in diesen Bereichen
- Optimierung von Überschweißungen beim Überlappen von Nähten
- Optimierung von Eigenspannungen und Verzug
- Erprobung von Verbindungen unterschiedlicher Legierungen
- Erprobung von Reparaturschweißungen
- Optimierung der Kantenvorbereitung (Fräsen)

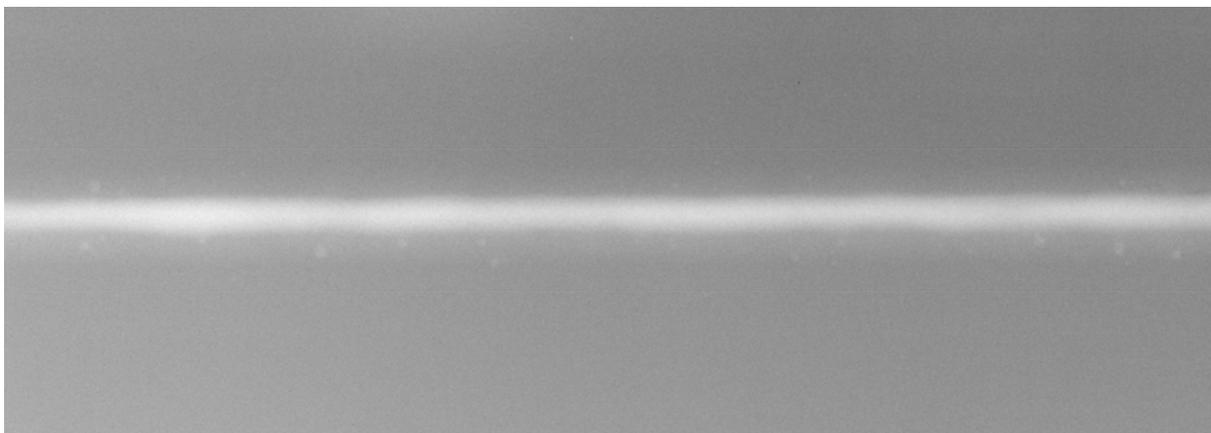
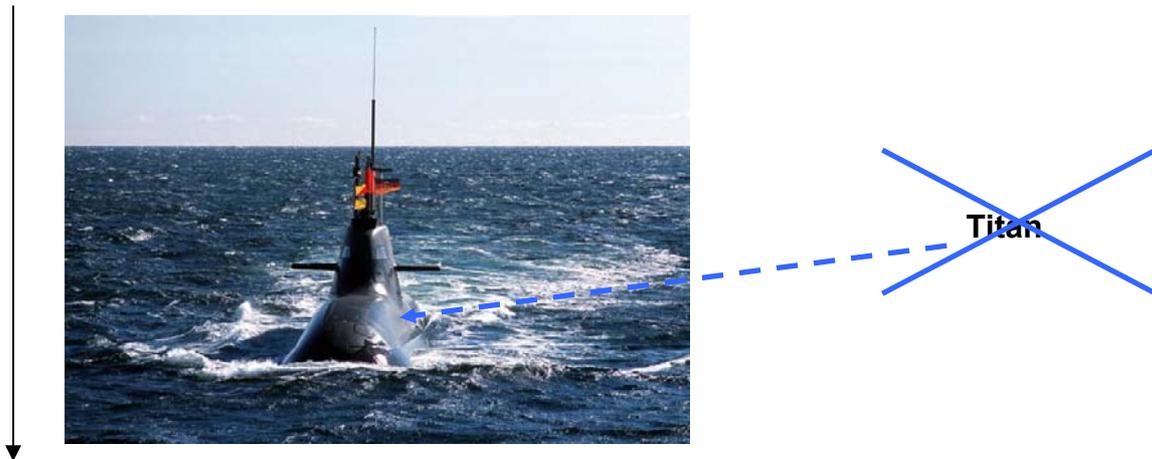


Abbildung 70 - Röntgenbild einer Laserschweißnaht [F5]

## 10 Teilprojekt: Werkstoffzulassung im Schiffbau

### 10.1 Ausgangssituation

Bevor im Schiffbau neue Werkstoffe eingesetzt werden dürfen, benötigen diese eine entsprechende Zulassung durch die jeweilige Klassifikationsgesellschaft. Dies betrifft besonders Materialien, die im Bereich der Schiffstruktur und Außenhaut eingesetzt werden. Für diese Werkstoffe und deren Verarbeitungsverfahren ist eine Eignungs- bzw. Zulassungsprüfung durchzuführen, die verschiedene Nachweise von der Erschmelzung des Materials bis hin zur Fertigbearbeitung und Berechnung beinhalten.



**Problem:** Seitens des Bundesamts für Wehrtechnik und Beschaffung oder des Germanischen Lloyds existieren derzeit sowohl für den militärischen als auch für den zivilen Bereich weder Zulassungen für Titanwerkstoffe noch entsprechende Prüfvorschriften. Es ist somit zum derzeitigen Stand der Zulassung nicht möglich, Titan im Bereich der Schiffstruktur einzusetzen.

### 10.2 Ziele des Teilprojekts Werkstoffzulassung

In diesem Teilprojekt werden in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung anhand von theoretischen und praktischen Untersuchungen die Anwendung von Titanwerkstoffen für Druckkörperanwendungen analysiert und bei Eignung die Prüfvorschriften zur Zulassung von Titan zum Druckkörperwerkstoff erstellt. Diese Vorschrift dient anschließend als Grundlage für die Zulassung von Titan als Druckkörpermaterial. Betrachtet werden dabei sowohl das Grundmaterial als auch geschweißte Bleche. Im Einzelnen beinhaltet dies die folgenden Punkte:

1. Definition der erforderlichen Werkstoffeigenschaften
2. Auswahl einer geeigneten Titanlegierung
3. Festlegung der Prüfungen für die Eignungsuntersuchungen
4. Durchführung der Eignungsuntersuchungen für die ausgesuchte Legierung

5. Auswertung der Prüfungsergebnisse
6. Einarbeitung der Prüfungen in die Zulassungsvorschriften der Klassifikationsgesellschaften
7. Erstellung eines vorläufigen Werkstoffleistungsblatts für den ausgesuchten Werkstoff

Falls die Untersuchungen für die Bauvorschriften des BWBs erfolgreich verlaufen, so ist weiterhin eine Einarbeitung der Titanprüfungen in die Klassifikationsvorschriften des Germanischen Lloyd geplant, um auch die Zulassung für zivile Anwendungen (Bsp. Forschungstauchboot ORCA) zu ermöglichen.

**BEACHTEN:**

Das Ergebnis dieser Untersuchung ist *nicht* die komplette Werkstoffzulassung einer Titanlegierung, sondern nur die Machbarkeitsaussage über eine mögliche Zulassung und die Änderung der notwendigen Zulassungsvorschriften.

### **10.3 Werkstoffeigenschaften + Legierungsauswahl**

Für den Einsatz von Titan als Druckkörpermaterial sind die in Kapitel „8.2 Anforderungen an Druckkörperwerkstoff“ definierten Materialeigenschaften notwendig. Wie in Kapitel 7 wird auch bei der Durchführung der Eignungsprüfung für geschweißte und ungeschweißte Bleche der Werkstoff TiAl3V2,5 als Referenz verwendet. Bisher existierte jedoch keine, für den Ubootbau verwendbare Technische Lieferbedingung für Bleche, so dass diese vor der Bestellung eines für die Materialzulassung geeigneten Bleches erstellt werden musste. Sowohl die Lieferbedingung als auch der entsprechende Herstellungsprozess wurden mit dem entsprechenden Blechhersteller ThyssenKrupp Titanium GmbH abgestimmt.

### **10.4 Prüfungen für Eignungsuntersuchung**

Zur Feststellung der Eignung von Titan als Druckkörperwerkstoff ist gemäß Bauvorschrift 1050 eine Vielzahl an Materialuntersuchungen notwendig. Diese sind einerseits für den Grundwerkstoff und andererseits für das jeweilige Fertigungsverfahren (hier: Laserschweißverbindung) durchzuführen. Zur Projektkostenminimierung sind jedoch in Absprache mit dem WIWeB vorerst nur folgende kritische Untersuchungen notwendig:

1. Blechabnahme mit 3.2-Zertifikat (gemäß Technischer Lieferbedingung)

Bei der Blechabnahme wird eine Vielzahl an Standardprüfungen durchgeführt, um Basiswerte des Grundmaterials mit dem jeweiligen Lieferzustand zu ermitteln. Dazu gehört neben der chemischen Untersuchung und der Mikrogefügeermittlung auch die Durchführung von Zug-, Druck- und Kerbschlagversuchen.

2. Technologischer Biegeversuch (BV 1.5.4.4.5)

Bei dem Technologischen Biegeversuch mit Biegewinkeln von bis zu 180 Grad wird die Kaltumformbarkeit des Materials getestet. Das Ziel ist das Erreichen von möglichst großen Verformungen ohne Beschädigung des Materials.

3. Dauerschwing- und Zeitstandversuch (BV 1.6.3.3.8.2, 1.6.3.3.9)

Bei diesen Versuchen werden Grenzwerte für die statische und dynamische Langzeitbeständigkeit ermittelt. Diese bilden die Grundlage für die Dimensionierung der Druckkörperkomponenten.

4. Spannungsrisskorrosionsversuch (BV1.6.3.3.15)

Einige Titanwerkstoffe sind empfindlich gegenüber Spannungsrisskorrosion in Seewasserumgebung. Dieser Test überprüft die Beständigkeit der ausgewählten Legierung.

5. Beultest (BV1.6.3.3.24)

Beim Beultest wird die hochdynamische Umformbarkeit des Materials mittels mehrerer Anspregungen untersucht.

Diese kritischen Untersuchungen werden im Rahmen eines Gemeinschaftsprojektes zwischen der HDW GmbH und dem WIWeB durchgeführt. Die bisher erfolgten Untersuchungen sind in den folgenden Teilkapiteln dargestellt. Anhand der ermittelten Kennwerte ist bei Abschluss dieses Projektes eine Aussage über die Eignung von Titan als Druckkörpermaterial möglich.

### **10.5 Ermittlung der mechanisch-technologischen Kennwerte**

Bei der Firma ThyssenKrupp Titanium GmbH wurde ein Referenzblech mit einer Größe von 4160mmx1450mmx20mm gefertigt, aus dem die Proben für die einzelnen Materialuntersuchungen entnommen wurden. Die Ermittlung der mechanisch-technologischen Werte ist für den Zeitraum 10/2009 - 12/2010 angesetzt und wird derzeit noch durchgeführt. Eine Auflistung der Ergebnisse im Rahmen dieser Arbeit ist aus vertragsrechtlichen Gründen nicht möglich.

### **10.6 Beultest**

Die Beultests werden gemäß BV1050 an geschweißten und ungeschweißten Ronden bei der Wehrtechnischen Dienststelle 91 in Meppen durchgeführt. Dabei werden Ronden aus Titan in einer Versuchseinrichtung mehreren Anspregungen unterzogen und deren Auswirkungen auf die Ronden ermittelt. Die Ronden werden dabei so oft angesprengt, bis eine definierte Verformung (Dickenminderung) erfolgt oder ein in Dickenrichtung durchgehender Riss auftritt. Im Folgenden ist ein Anspregversuch dargestellt:

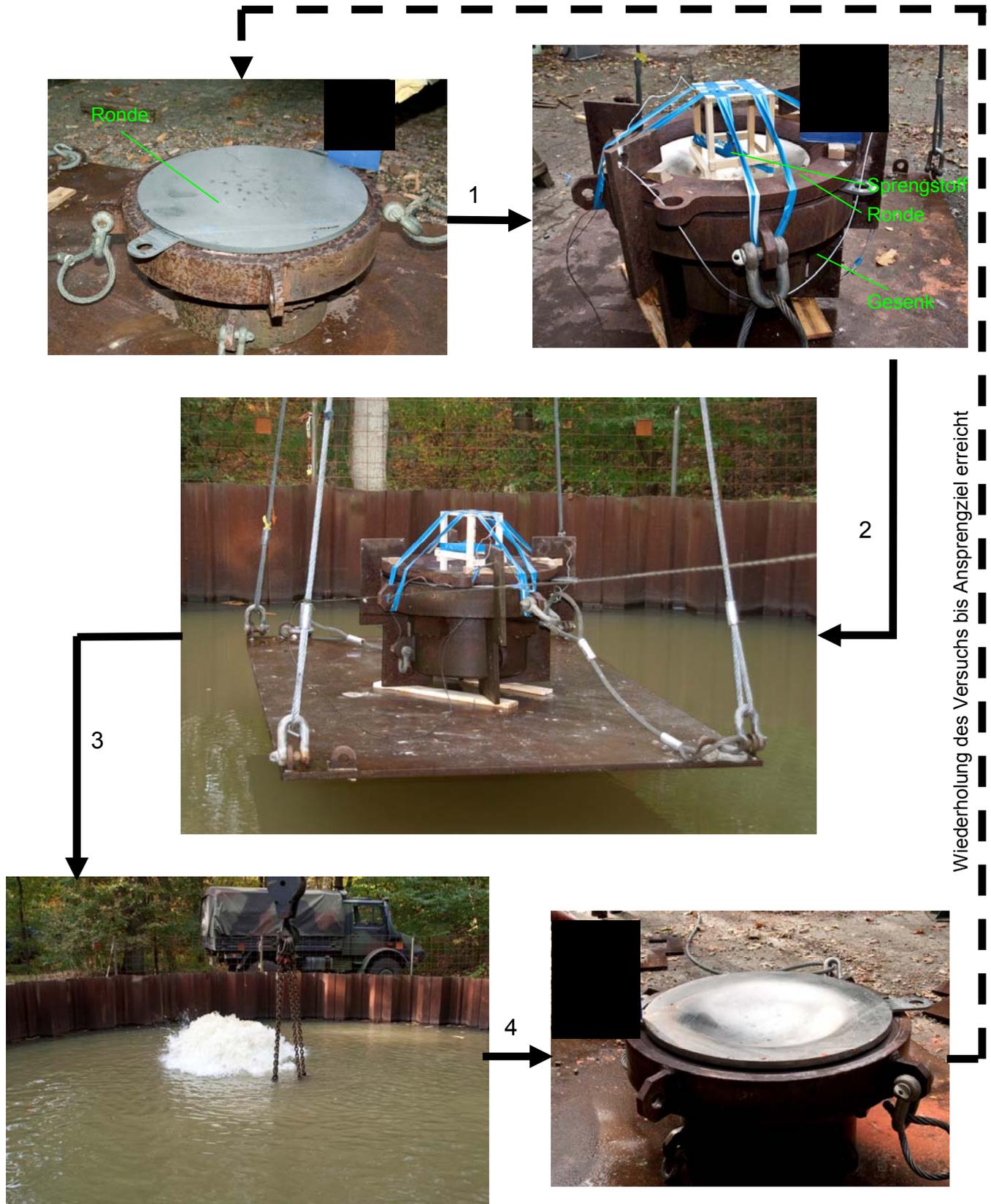


Abbildung 71 - Anspengversuch [WTD91]

Legende:

- 1 = Montage der Anspengronde + Sprengstoff auf Gesenk
- 2 = Absenken der Vorrichtung im Wasserbecken (4m tief)
- 3 = Zünden der Sprengladung
- 4 = Rissprüfung + Vermessung + Auswertung

### 10.6.1 Vorbetrachtungen

Aufgrund der Tatsache, dass es bisher noch keine Festlegungen der Sprengparameter (Sprengstoffmenge oder zulässige Verformungen) gibt, sind diese Kennwerte mittels iterativer Anspengversuche zu ermitteln. Da dies jedoch einen hohen Materialeinsatz und extrem hohe Versuchskosten bedeuten kann, sind im Vorfeld durch die Berechnungsabteilung der HDW GmbH theoretische Betrachtungen mit Hilfe von FEM-basierenden Berechnungsverfahren durchgeführt worden, um die optimale theoretische Sprengstoffmenge zu ermitteln.

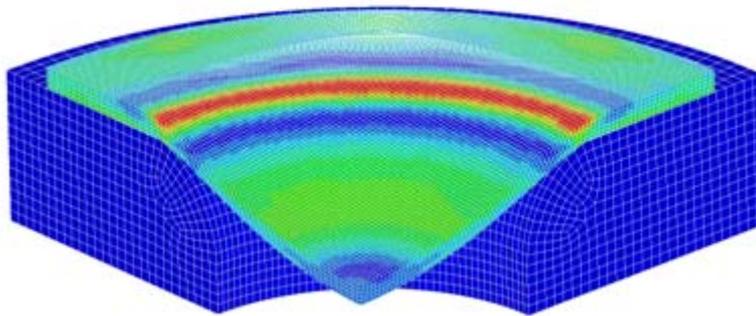


Abbildung 72 - FEM-Simulation einer Anspengung [F1]

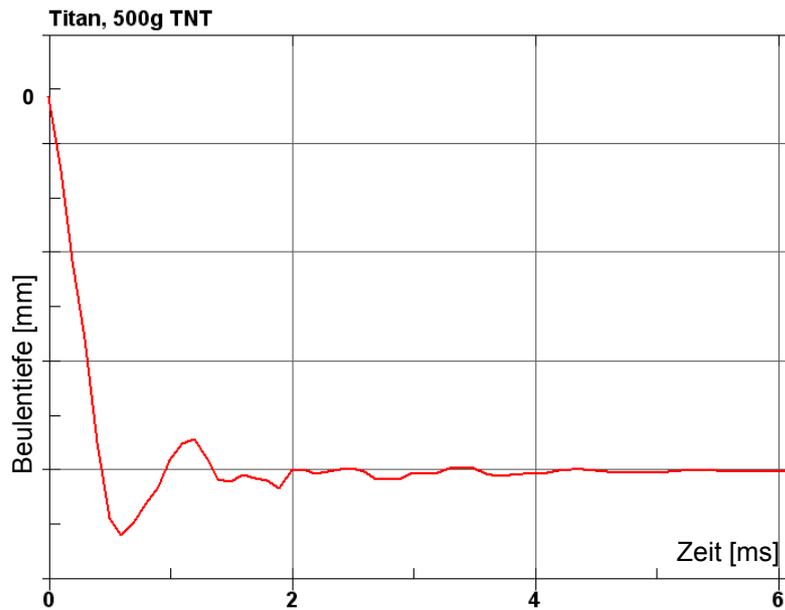
Im ersten Ansatz wurden dabei die gleichen Sprengparameter wie für den Werkstoff HY80 verwendet, da dafür Ergebnisse aus bereits erfolgten Untersuchungen vorlagen. Bei der Simulation der Anspengungen wurden folgenden Ergebnisse erzielt:

Tabelle 26 - Vorbetrachtung Beultest

Werkstoff	TiAl3V2,5 (Simulation)	Referenz - HY80 (Simulation)	Referenz - HY80 (reale Anspengung)
<b>Rondendicke</b> [mm]	20	25	25
<b>Sprengstoffmenge</b> [g]	500	1000	1000
<b>max. Verformung</b> [mm]	68	96,5% der realen Anspengung <sup>7</sup>	100% der realen Anspengung
<b>max. Spannungen</b> [N/mm <sup>2</sup> ]	1200	1370	---

Der zeitliche Verlauf einer solchen Anspengung ist in der folgenden Grafik dargestellt:

<sup>7</sup> Reale Werte aus Gründen der VS-Einstufung nicht veröffentlicht.

Abbildung 73 - Verformungs-Zeit-Diagramm Anspregung [F1]<sup>8</sup>

Daraus ist erkennbar, dass die Umformung in Folge der Detonation extrem schnell erfolgt und somit die Materialkenndaten aus dem statischen Zugversuch nicht verwendet werden können. In den Ergebnissen wurden dennoch diese Kurven eingesetzt, da es sich bei der Simulation nur um eine Näherungsrechnung handelt, die bei der HY80-Referenzierung ähnliche Ergebnisse wie reale Anspregungen lieferte.

**Fazit:**

Eine Sprengstoffmenge von 500g führte laut Berechnungen trotz großer Verformung nicht zu einer Zerstörung der Ronde, so dass diese Menge für die iterativen, realen Anspregversuche zur Ermittlung der Sprengstoffmenge und der Materialeigenschaften als Startparameter sinnvoll ist.

### 10.6.2 Beultest – ungeschweißte Ronde

Insgesamt wurden Anspregversuche an vier ungeschweißten Ronden mit einer Materialstärke von 20mm in Anlehnung an die BV1050 für Schiffbaustähle (HY80) durchgeführt. Dabei wurden sowohl die notwendigen Sprengparameter als auch die Materialeigenschaften bei Anspregung ermittelt. Iterativ wurden dabei folgende Versuchparameter für die Anspregungen an Titanronden mit einer Blechstärke von 20mm festgelegt:

<sup>8</sup> 0 = Koordinatenursprung im Punkt mit der größten Beultiefe

Tabelle 27 - Ansprengeversuche - Sprengstoffmenge

<b>Anspregung</b>	1	2	3	4	5	folgende
<b>Sprengstoffmenge [g]</b>	500	500	500	250	250	250

Mit dieser Versuchsreihe wurden Beultiefen  $\gg 100\text{mm}$  erreicht<sup>9</sup> und die Duktilität des Materials konnte erfolgreich nachgewiesen werden.



Abbildung 74 - Ergebnis der Anspregung [F6]

Entscheidend sind bei diesen Versuchen weder die erreichten Beultiefen oder die Anzahl der überstandenen Anspregungen, sondern die Dickenminderung der Blechstärke für das Bestehen dieses Tests (Norm für Stahl). Die Vorgaben für Stahl hinsichtlich Dickenminderung konnten dabei durch die Titanronden (trotz gleicher Beultiefen) nicht erreicht werden. Der Grund dafür ist, dass Titan im gesamten Material ein gleichmäßigeres Fließverhalten (als HY80) aufweist. Die Beultiefen werden somit erreicht, nicht jedoch die lokalen Einschnürungen. Dieser Unterschied ist bei der Erstellung der Norm für die Zulassung für Titanwerkstoffe zum Druckkörpermaterial und für die Berechnungsvorschriften für Druckkörper aus Titan zu berücksichtigen. Zunächst sind jedoch noch die geschweißten Ronden zu testen, da diese Ergebnisse notwendig für die Zulassung von geschweißten Komponenten sind.

### 10.6.3 Beultest – geschweißte Ronde

Die geschweißten Ronden werden analog zu den ungeschweißten Proben getestet. Dabei wird der Einfluss der Schweißnaht auf das hochdynamische Kaltumformverhalten ermittelt. Diese Versuche sind für das laufende Kalenderjahr geplant.

<sup>9</sup> Aufgrund der VS-Einstufung ist die Angabe der genauen Ergebnisse nicht zulässig.

### 10.7 Fazit

Obwohl aufgrund ausstehender Materialversuche (Beultest an geschweißten Ronden und Technologischer Biegeversuch) noch keine endgültige Bewertung des Einsatzes von Titan als Druckkörpermaterial durchgeführt werden kann, lässt sich dennoch das Entwurfspotential von Titan darstellen. Sobald alle Prüfungen fertig gestellt sind, ist eine Überarbeitung der Bauvorschrift 1050 des BWB notwendig, um den Werkstoff Titan für Druckkörperanwendungen verwenden zu können.



Titan

## 11 Teilprojekt: Lukendeckel aus Titan

### 11.1 Aktueller Stand der Technik

Die Lukendeckel an Bord eines Unterseeboots sind als Bestandteil des Druckkörpers die einzigen Öffnungen im Schiffsrumpf zum Ein- bzw. Ausstieg. Weiterhin dienen sie zum Be- und Entladen von Material. Deshalb wird angestrebt, möglichst große Lukendeckel zu integrieren, um auch nach Fertigstellung des Druckkörpers möglichst große Komponenten zu übernehmen bzw. wieder von Bord geben zu können.

Derzeit sind Lukendeckel aus Stahl mit einem lichten Durchmesser von ca. 600-800mm im Einsatz, die jedoch eine Gesamtmasse von bis zu 380kg vorweisen. Zum Öffnen dieser Ausstiegsmöglichkeit sind demnach enorme Handkräfte notwendig, die das Handling dieser Komponenten deutlich herabsetzen und ab einem gewissen Trimmwinkel nur mit Hilfsmitteln zu öffnen sind.

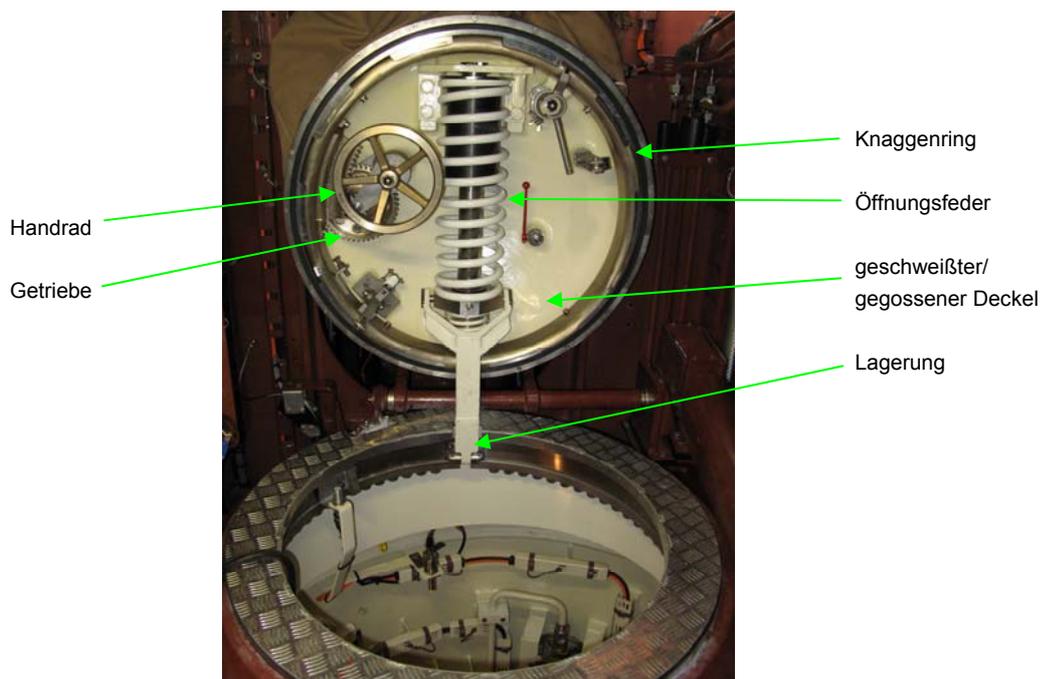


Abbildung 75 - Stahl - Lukendeckel für seitlichen Ausstieg [F1]

Zur Gewichtsreduzierung und somit zur deutlichen Verbesserung des Handlings ist der Einsatz von Titanwerkstoffen empfehlenswert. Dabei ist jedoch zu beachten, dass es sich bei den Lukendeckeln um Druckkörperkomponenten handelt und die erforderlichen Werkstoffe nach BV1050 zugelassen werden müssen.

### 11.2 Vor- und Nachteile eines Lukendeckels aus Titan

In der folgenden Auflistung sind die Vor- und Nachteile eines Lukendeckels aus Titan im Vergleich zur Stahlvariante dargestellt:

**Vorteile:**

- Gewichtersparnis im Vergleich zur Stahlausführung
- deutlich verbessertes Handling durch Verringerung der Masse
- Vergrößerung des lichten Durchmessers bei gleich bleibender Masse möglich
- hohe Korrosionsbeständigkeit, speziell in den Dichtflächen
- amagnetischer Werkstoff

**Nachteile:**

- eventuell höhere Material- und Fertigungskosten

**11.3 Lukendeckelentwurf**

Im Rahmen dieser Dissertation wurde ein neues Lukendeckelkonzept entwickelt, welches einerseits das Handling deutlich verbessert und andererseits auch einen Rettungsschleusenvorgang unter Trimm- bzw. Krängungswinkeln von bis zu  $45^\circ$  ermöglicht. Dies wurde sowohl durch die Werkstoffsubstitution von Stahl mit Titan inklusive Konturoptimierung als auch durch eine Änderung des Öffnungsmechanismus erreicht.

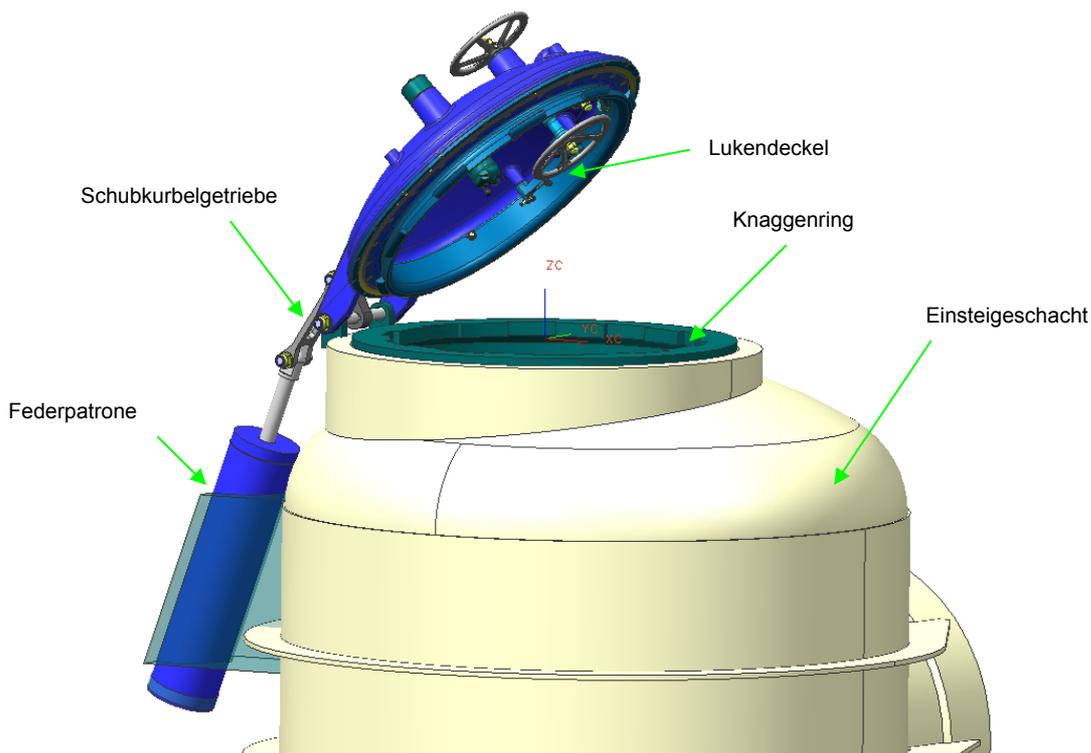


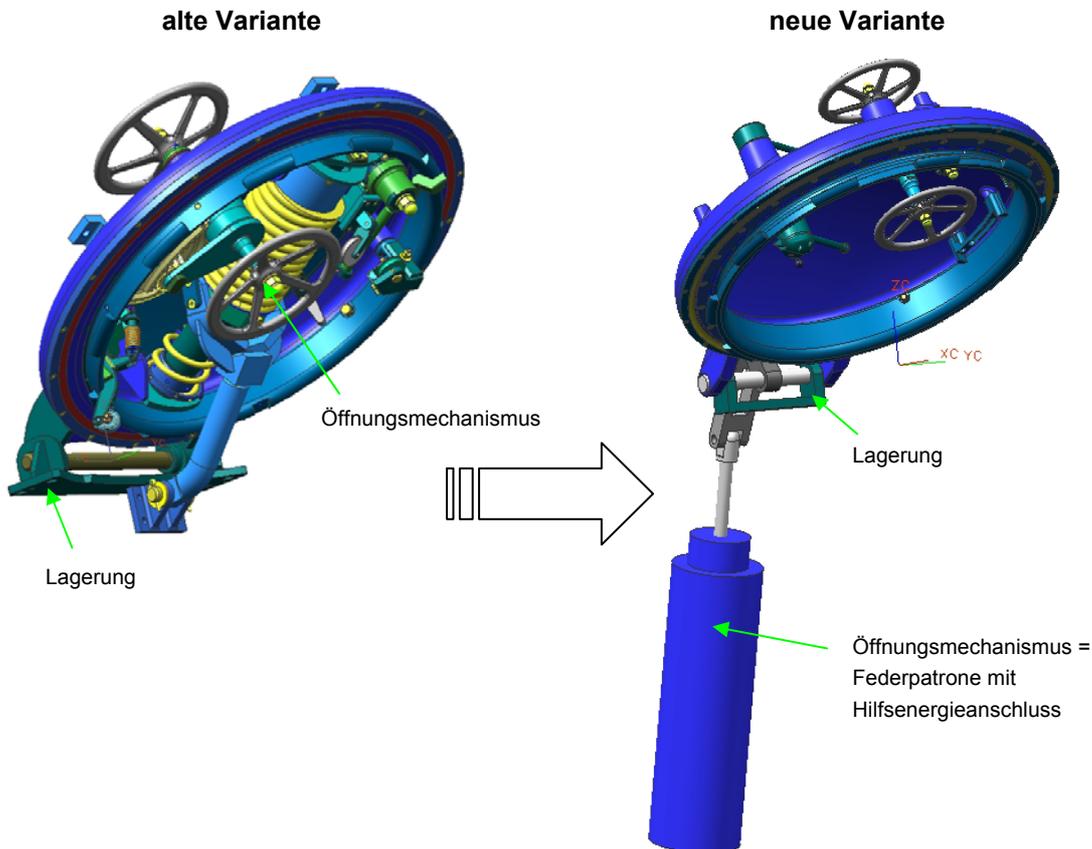
Abbildung 76 - Lukendeckel Titan

Dabei wurde eine externe Federpatrone integriert, die mittels Zusammenschaltung mehrerer Einzelfedern eine optimierte Öffnungskraft- zu Öffnungswinkel-Kennlinie erzeugt (siehe auch Berechnungen). In einer Notsituation kann zusätzlich eine Hilfsenergieunterstützung für die Federpatrone eingeschaltet werden, die bei einem

Schleusenvorgang ein Öffnen und Schließen des Deckels auch bei großen Trimm- bzw. Krängungswinkeln ermöglicht.

### 11.4 Variantenvergleich

In der folgenden Auflistung wird die neue Titanvariante mit dem bisherigen Deckel verglichen:



#### Vorteile:

- kompakte Ausführung
- keine externe Energiezuführung

#### Nachteile:

- hohes Gesamtgewicht
- Öffnungsmechanismus muss mit angehoben werden
- ungünstige Öffnungskraftverteilung
- kein Öffnen bei großen Trimmwinkeln möglich
- manuelles Schließen bei Rettungsschleusenvorgang durch Kurbelmechanismus notwendig

#### Vorteile:

- geringes Gesamtgewicht
- Öffnungskraft an Öffnungswinkel durch Federpatrone optimal angepasst
- Betriebsfall (Trimm=0°) ohne Hilfsenergie
- Öffnung bei großen Trimmwinkeln mit Hilfsenergie möglich

#### Nachteile:

- autarkes Hilfsenergiesystem notwendig (Druckspeicher + Steuerungstechnik)
- Bauraum außerhalb des Lukendeckels notwendig

Die mechanischen Schnittstellen (Bsp. Scharnieranbindung, Anordnung der Funktionsflächen) wurden dabei von der Stahlvariante übernommen. Bei der Verwendung eines Lukendeckels aus Titan ist jedoch zur Spaltkorrosionsminimie-

rung darauf zu achten, dass der Kontaktwerkstoff am Süll ebenfalls Titan oder ein vergleichbar korrosionsbeständiger Werkstoff ist. Durch die relativ geringe Oberflächenhärte der Werkstoffe ist (wie beim Stahllukendeckel) ebenfalls ein entsprechender Dichtflächenschutz (Bsp. aus Gummi) gegen Kratzer bei Be- und Entladearbeiten notwendig.

## 11.5 Berechnung

### 11.5.1 Druckfeste Auslegung des Deckels

Anhand der angefertigten Entwürfe von Lukendeckeln aus Titan wurden die in der Tabelle aufgestellten Berechnungen im Vergleich zu der aktuellen Stahlvariante mittels FEM durchgeführt. Als Grundlage dafür dient ein gegossener Lukendeckel mit einem lichten Durchmesser von 800mm.

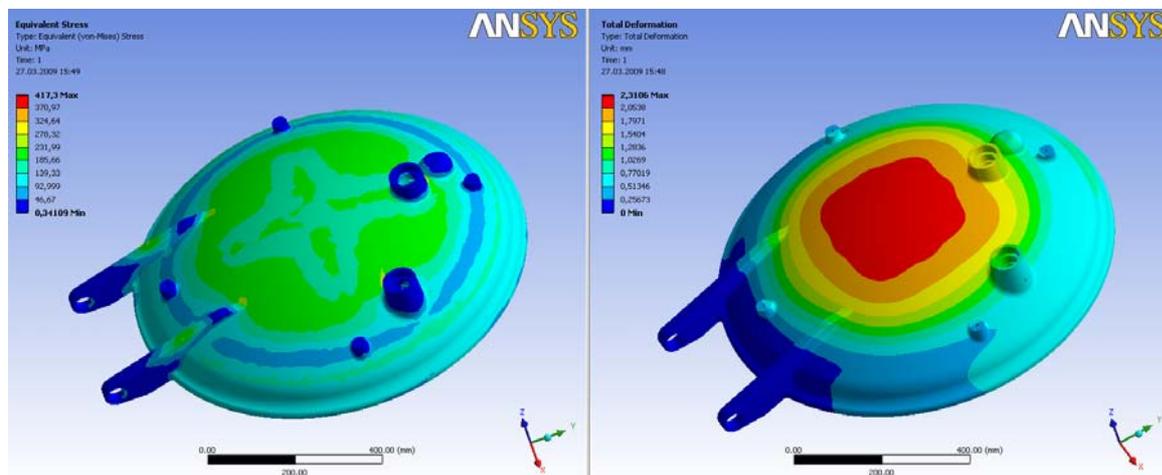


Abbildung 77 - FEM-Simulation Titandeckel, links: Spannungen, rechts: Verformung

Der Vergleich der beiden Simulationen brachte folgende Ergebnisse:

Tabelle 28 - Vergleich Lukendeckelvarianten

Variante	Stahl	Titan
<b>Werkstoff</b>	1.4468	3.7195
<b>Masse des Lukendeckels ohne Anbauteile [kg]</b>	196	92
<b>maximale Dehngrenze des Werkstoffs [N/mm<sup>2</sup>]</b>	480	483
<b>minimale Materialstärke [mm]</b>	15	13
<b>Berechnungstiefe relativ zur Stahl-Variante [%]</b>	100	100
<b>maximale Spannung [N/mm<sup>2</sup>]</b>	250	340
<b>maximale Verformung [mm]</b>	1,0	2,3

Die Ergebnisse zeigen, dass die Masse des Deckels im Vergleich zur bisherigen Variante deutlich gesenkt werden konnte, was eine **Einsparung von ca. 53 Prozent** bedeutet. Allerdings wurden durch die Verringerung der Materialstärke die Spannungen und die Verformung geringfügig vergrößert. Aufgrund der Tatsache, dass sich im Deckel keine verformungsempfindliche Öffnungsmechanik mehr befindet, ist die Vergrößerung der Verformung und somit die bessere Ausnutzung des Materials hinsichtlich Spannungen zulässig.

### 11.5.2 Berechnung der Öffnungskräfte

Durch die Auslagerung der Federunterstützung, die Verringerung des Deckelgewichts und die belastungsoptimierte Federkennlinie konnten die Betätigungskräfte des Lukendeckels deutlich gesenkt werden. Im folgenden Diagramm<sup>10</sup> werden die Kräfte für die Lukendeckelöffnung bei ebenlastigem Kiel im aufgetauchten Zustand betrachtet:

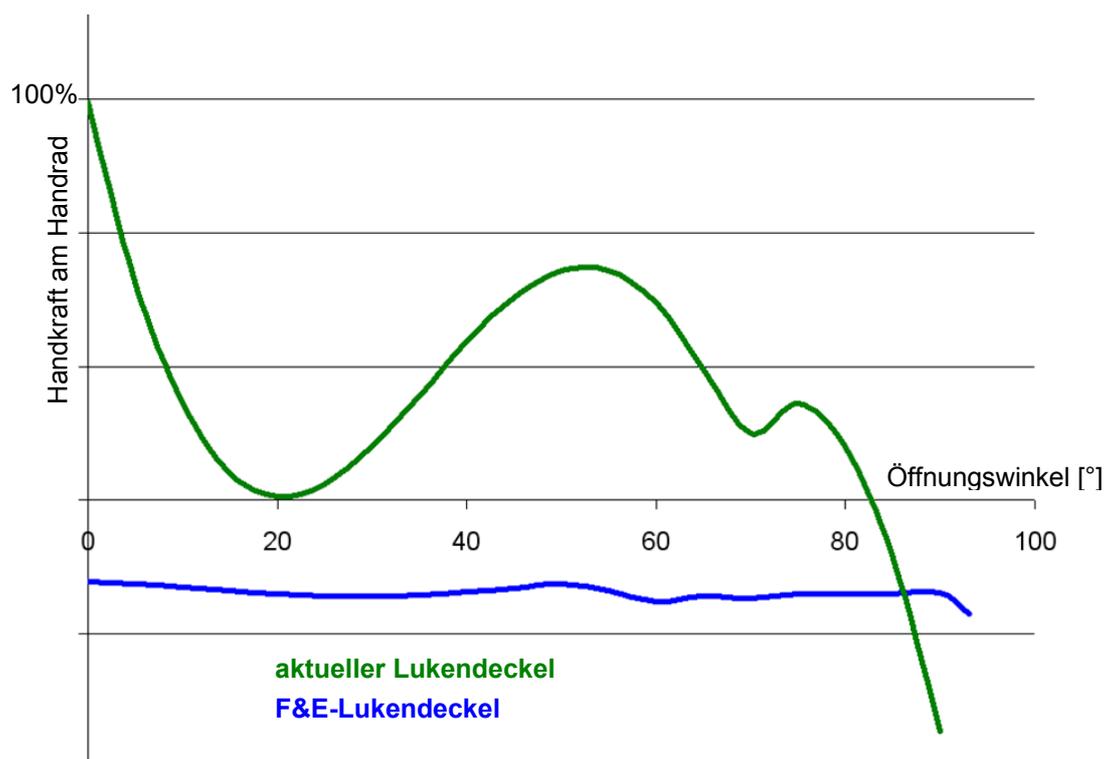


Abbildung 78 - Öffnungskräfte Lukendeckel - Vergleich

Insgesamt konnten durch die Optimierungen eine Reduzierung der Betätigungskräfte von bis zu **80 Prozent** erzielt werden. Bei geringen Trimm-/Krängungswinkeln bis zu 10° beträgt die Krafteinsparung ca. 60 Prozent.

<sup>10</sup> Die absoluten Werte wurden aus Gründen der Sicherheitseinstufung weggelassen

### 11.6 Fazit

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein komplett neuer Gesamtentwurf des Lukendeckelsystems durchgeführt. Durch den Einsatz von Titan und der Verwendung eines neuartigen Öffnungsmechanismus konnte das Gesamtgewicht der vom Bediener anzuhebenden Masse von ca. 350kg auf 195kg verringert werden. Dies entspricht einer Gewichtseinsparung von ca. 45 Prozent. Weiterhin konnten die Öffnungskräfte deutlich reduziert und das Handling dieser Komponente im Betriebs- und im Notfall enorm verbessert werden.

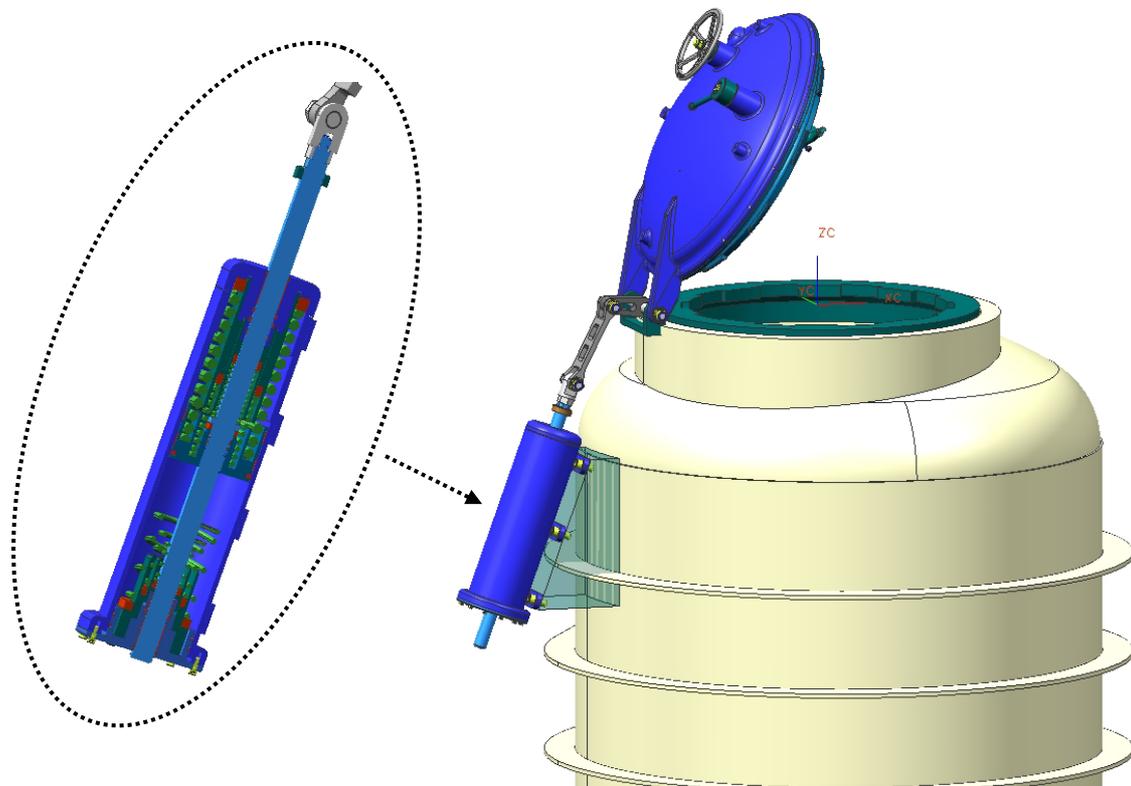


Abbildung 79 - Lukendeckel Titan

### 11.7 Patentanmeldung

Das im Rahmen dieser Dissertation entwickelte Konzept zur Verbesserung der Handhabung eines großen Lukendeckels und die damit verbundene Vergrößerung des maximal zulässigen Trimmwinkels für die Rettungsschleusenfunktion wurde als Dienstleistung angemeldet und befindet sich derzeit im Patentanmeldeverfahren.

## 12 Teilprojekt: Forschungstauchboot „ORCA“

Die Grundlage für dieses Projekt bildet das Tauchboot „JAGO“ des Instituts für Meeresforschung IFM GEOMAR in Kiel, welches die Erforschung des Meeresbodens bis zu einer Tiefe von 400m ermöglicht. Dieses Boot kann zwei Besatzungsmitglieder aufnehmen und bietet aufgrund seines geringen Gesamtgewichts von nur 3,5t und den minimalen Außenabmessungen die Möglichkeit eines flexiblen Transports und Einsatzes im Zielgebiet.



Abbildung 80 - Referenzboot JAGO [F1]

Für die zukünftigen Aktivitäten in größeren Wassertiefen wurde von der IFM GEOMAR in Zusammenarbeit mit der Fachhochschule Kiel eine Marktstudie für das neue Tauchboot „ORCA“ angefertigt, welches eine Betriebstauhtiefe von 1000m bei **gleichem Gesamtgewicht, gleichen Außenabmessungen und gleichen Funktionen** aufweisen soll. Nach ersten überschläglichen Berechnungen konnte dies nur mit dem Einsatz von Titan als Druckkörpermaterial zur Einhaltung der Gewichtsgrenzen realisiert werden.

### 12.1 Druckkörperdimensionierung

Im Rahmen des Teilprojekts: Forschungstauchboot „ORCA“ wurde der Druckkörper sowohl mit den Berechnungsmethoden des Germanischen Lloyds als auch mit einem von HDW entwickelten, FEM-basierenden Berechnungsverfahren dimensioniert und die Werkstoffe Stahl und Titan für diese Anwendung miteinander verglichen (siehe auch Publikation [P37]). Als Grundlage wurde folgender Grobentwurf verwendet:

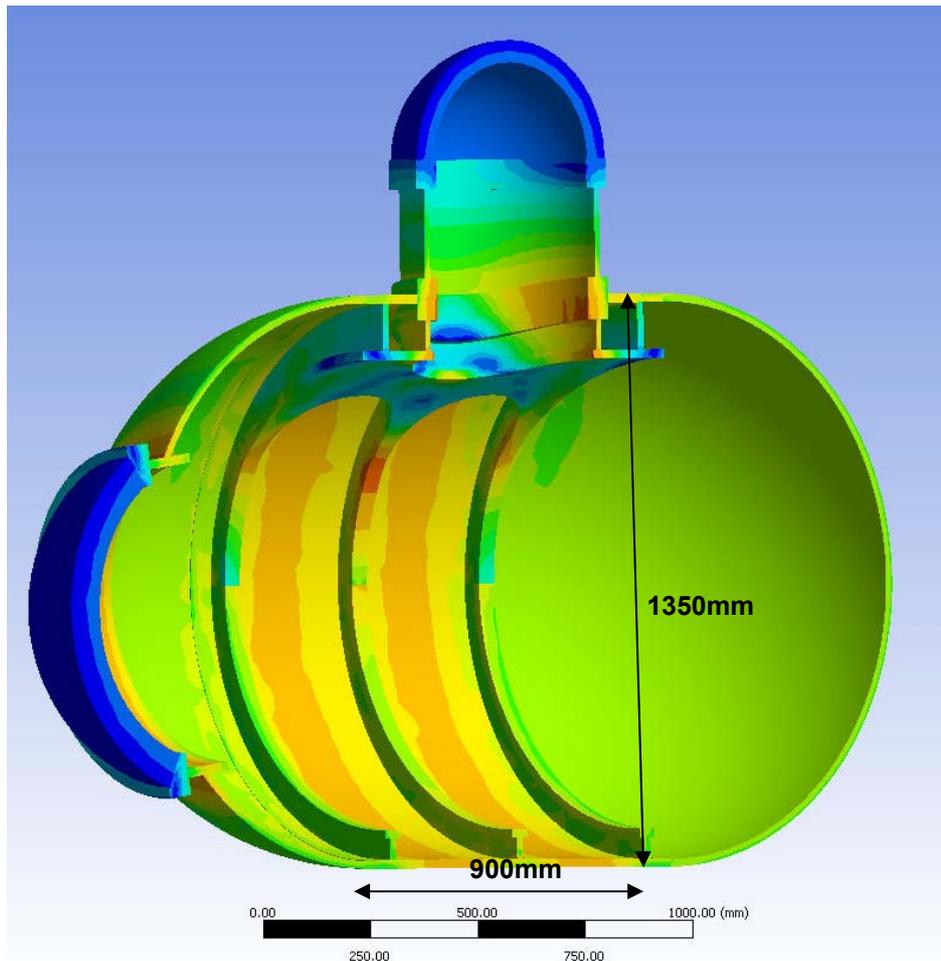


Abbildung 81 - FEM-Spannungsanalyse ORCA [F1]

Das Ziel der Dimensionierung war die Einhaltung des durch das Vorgängermodell JAGO definierten Gewichts, jedoch bei deutlich gesteigerter Tauchtiefe (JAGO= 400m, ORCA=1000m). Für die Dimensionierung wurden folgende Parameter vorgegeben:

- |                          |        |                        |
|--------------------------|--------|------------------------|
| ▪ Nenntauchtiefe:        | 1000m  | } Forderungen gemäß GL |
| ▪ Prüftauchtiefe:        | 1200m  |                        |
| ▪ Zerstörungstauchtiefe: | 1730m  |                        |
| ▪ maximales Gewicht:     | 1360kg |                        |

Annahme: Bei dieser Dimensionierung wurde die Unrundheit auf Null Prozent gesetzt, da der Druckkörper aus spanend bearbeiteten Komponenten gefertigt wird und die Anzahl der Schweißverbindungen und somit auch der Verzug minimiert worden ist.

Insgesamt wurden drei Berechnungsverfahren angewendet und miteinander verglichen:

1. Berechnung eines Stahl-Druckkörpers aus HY140 mit Hilfe des FEM-basierenden Berechnungsverfahrens von HDW
2. Berechnung eines Titan-Druckkörpers aus TiAl3V2,5 nach den Vorschriften des Germanischen Lloyds [N10]
3. Berechnung eines Titan-Druckkörpers aus TiAl3V2,5 mit Hilfe des FEM-basierenden Berechnungsverfahrens von HDW

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in folgender Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 29 - Druckkörperdimensionierung ORCA [P37]

	Tauchboot JAGO	Tauchboot ORCA		
	Stahl E355 (GL)	HY140 (FEM)	TiAl3V2,5 (GL)	TiAl3V2,5 (FEM)
<b>Neuntauchtiefe [m]</b>	400	1000	1000	1000
<b>Berechnungstauchtiefe = Zerstörungstauchtiefe [m]</b>	600	1730	1730	1730
<b>Gewicht Druckkörper [kg]</b>	1363	1413	1229	1057
<b>Gewicht Turm [kg]</b>	11	26	26	26
<b>Gewicht Sichtfenster [kg]</b>	25	55	55	55
<b>Gesamtgewicht [kg]</b>	1399	1494	1310	1138
<b>Gewichtvergleich JAGO [%]</b>	<b>100</b>	<b>107</b>	<b>94</b>	<b>81</b>

Durch den Einsatz des FEM-Verfahrens konnte das Gewicht des ORCA-Druckkörpers im Vergleich zum JAGO-Druckkörper aus Stahl (trotz enormer Tauchtiefenvergrößerung) deutlich gesenkt werden. Auf der anderen Seite konnte selbst durch den Einsatz eines hochfesten Schiffbaustahls für das ORCA-Tauchboot das Gewicht des JAGO-Tauchboots nicht erreicht werden. **Die Titan-Ausführung besitzt somit im Vergleich zur HY140-Variante ein um 24 Prozent reduziertes Gesamtgewicht.**

## 12.2 Druckkörperdesign

Im Rahmen dieser Dissertation wurde anhand der Berechnungen ein Druckkörperentwurf für das Forschungstauchboot ORCA erstellt, welcher die charakteristischen Material- und Verarbeitungseigenschaften von Titan berücksichtigt und die Schweißverbindungen deutlich reduziert:

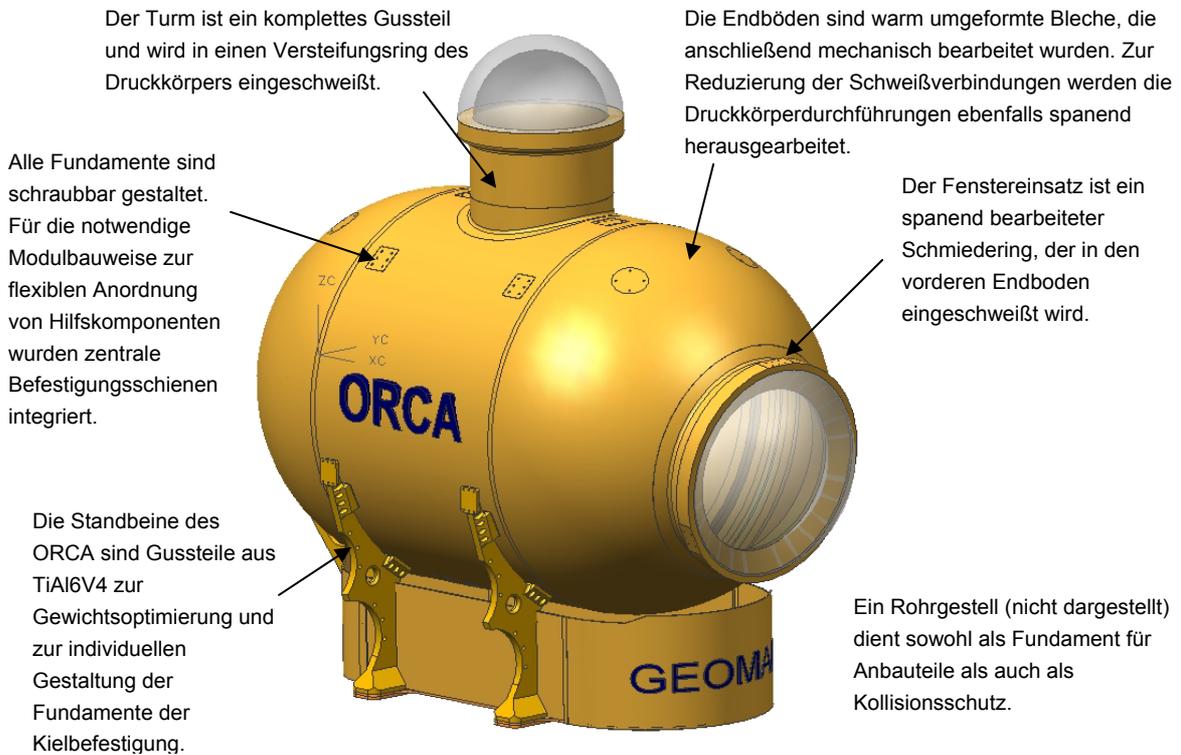


Abbildung 82 - Forschungstauchboot ORCA - Druckkörper

Der gesamte Druckkörper wird nur mittels vier Schweißverbindungen (Ausnahme: Halter im Innenbereich) hergestellt. Die erhöhten Materialkosten durch den gesteigerten Materialbedarf für die spanende Bearbeitung (Bsp. der Spanten) werden aufgrund der Gesamtgröße des Druckkörpers durch die Einsparung an Schweißarbeiten relativiert.

### 12.3 Fazit

Durch den konsequenten Einsatz von Titan konnte das Gesamtgewicht im Vergleich zu einer Stahlvariante deutlich reduziert werden. Die Gewichtsgrenze von 3,5t für das Tauchboot wurde somit nicht überschritten und garantiert weiterhin den flexiblen Einsatz des Tauchboots.

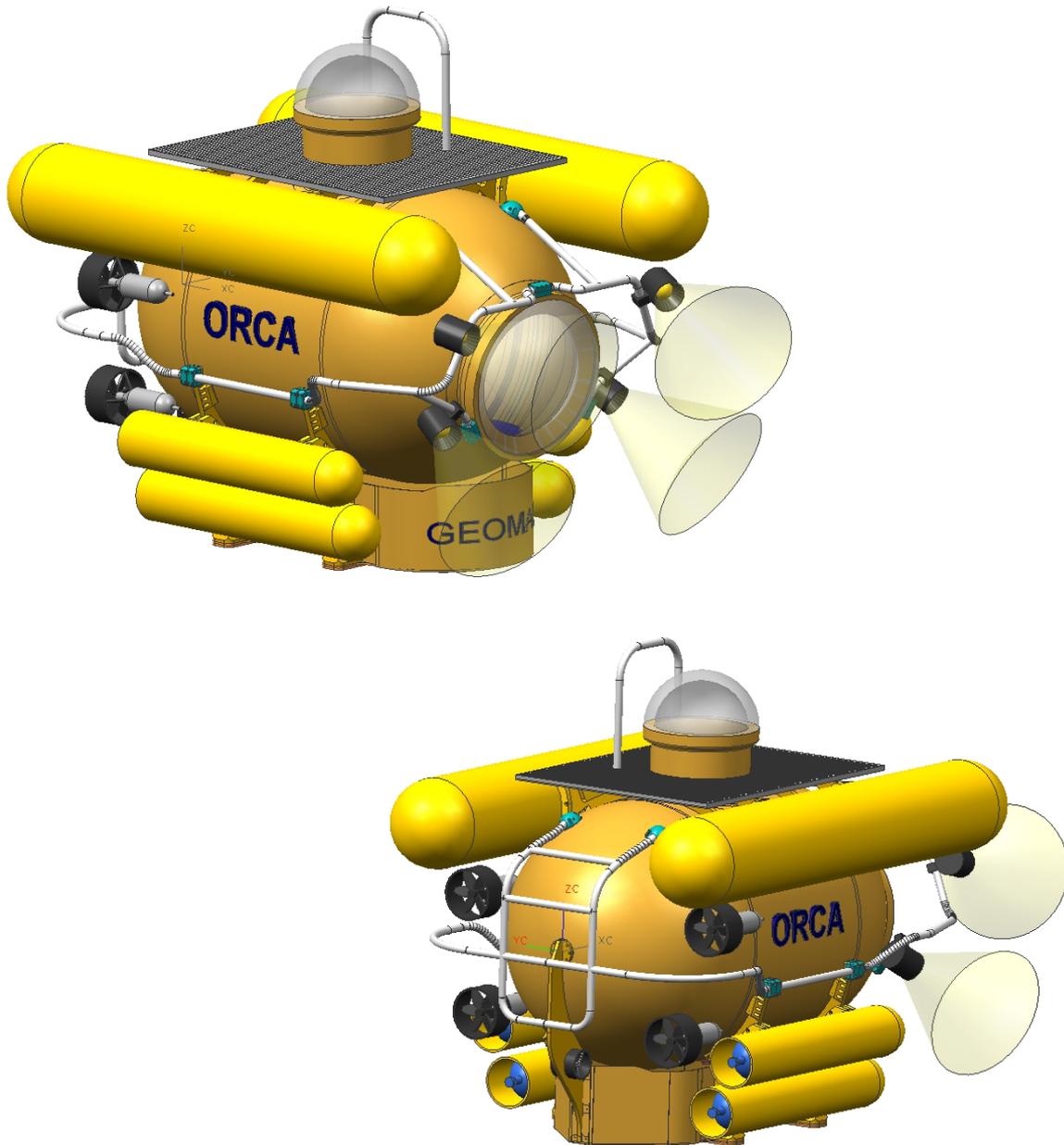


Abbildung 83 - Studie: Forschungstauchboot ORCA



## 13 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Dissertation wurde der Einfluss von Titan auf den Entwurf von meeres-technischen Systemen, speziell auf Unterwasserfahrzeuge, untersucht. Dabei sind zunächst die werkstoffseitigen Grundlagen erarbeitet und im Hinblick auf den Einsatz in der Seewasserumgebung bewertet worden. Im Anschluss daran wurden mögliche Anwendungen im Ubootbau untersucht und die technische und wirtschaftliche Realisierbarkeit analysiert. Das Ergebnis ist, dass Titan in vielen Anwendungen teilweise enorme technische Verbesserungen ermöglicht und somit als High-Tech-Werkstoff ein hohes Entwicklungspotential für den Schiffbau bietet. Allerdings kann aufgrund der spezifischen Anpassung jeder Komponente an die jeweilige Ubootklasse oder an Kundenforderungen keine allgemeingültigen Aussagen hinsichtlich der technischen und wirtschaftlichen Auswirkungen getroffen werden, sondern es sind immer anwendungsbezogene Werkstoffvergleiche durchzuführen.



Abbildung 84 - Klasse 212A in schwerer See [F1]

In vielen Industriezweigen wird Titan bereits erfolgreich eingesetzt und seit kurzer Zeit ist nun auch das Interesse im Spezialschiffbau vorhanden. Dies wird auch durch die vielen, auf der Howaldtswerke-Deutsche Werft GmbH laufenden, Anschlussprojekte verdeutlicht, in denen gezielt die Weiterentwicklung von Komponenten durch die Werkstoffsubstitution mit Titan angestrebt wird. Zu nennen sind dabei die im Rahmen dieser Dissertation begonnenen F&E-Projekte zur Entwicklung von Lukendeckeln, Schotttüren und außendruckfesten Behältern, als auch das beantragte BMBF-Vorhaben, bei dem in einem Gemeinschaftsprojekt mit der Industrie und der Wissenschaft die Grundlagen für große Schmiedekomponenten aus Titan untersucht werden sollen. Hingegen ist der Einsatz von Titan im Nicht-Druckkörper-Bereich ohne umfassende Werkstoffzulassung praktisch ab sofort möglich, während für Druckkörperbestandteile zunächst der komplette Zulassungsprozess gemäß Bauvorschrift 1050 durchzuführen ist. Dazu sind ebenfalls weitere Untersuchungen hinsichtlich der Urform- und Verarbeitungsmöglichkeiten notwendig.



## 14 Verzeichnisse und Quellenangaben

### Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Unterseeboot U31 der Deutschen Marine [I1] .....	1
Abbildung 2 - Containerschiff [F1] .....	3
Abbildung 3 - Tauchroboter „Nautile“ [I3] .....	3
Abbildung 4 - Ölbohrinsel „SEADRILL WEST AQUARIUS“ [www.oilrig-photos.com, 13.07.2010] .....	4
Abbildung 5 - Fregatte (links), Uboot (rechts) [F1] .....	5
Abbildung 6 - Titan-Schmelzblöcke [F2] .....	6
Abbildung 7 - Uboot Klasse 212A [F1] .....	8
Abbildung 8 - 3 Modifikationen von Titandioxid (v.l. : Anatas, Brookit, Rutil) [I2] .....	9
Abbildung 9 - Titangewinnung [P25, S.17] .....	10
Abbildung 10 - Europäische Marktanteile 2005 [P2, S.3] .....	11
Abbildung 11 - Titanelemente im Airbus A350 [P2, S.6] .....	11
Abbildung 12 - Kostenvergleich [P9, S.5] .....	12
Abbildung 13 - qualitativer Werkstoffvergleich Zug-Dehnungskurven .....	1
Abbildung 14 - Dehngrenze / Dichte - Vergleich .....	16
Abbildung 15 - TiAl6V4 mit Lanthan [P19] .....	22
Abbildung 16 - Querschnitt Uboot 212A [F1] .....	25
Abbildung 17 - Skizze Biegebalken .....	29
Abbildung 18 - Anschweißbolzen .....	31
Abbildung 19 - Druckkörperdurchführung [N11] .....	32
Abbildung 20 - Ausfahrgeräte eines Uboots [F1] .....	33
Abbildung 21 - Sehrohr: links SERO 400 [www.zeiss.de 15.01.2010], rechts Zeichnung [F1] .....	35
Abbildung 22 - CAD-Beispiel Propeller .....	38
Abbildung 23 - Befestigung der Propellerblätter [F1] .....	41
Abbildung 24 - Wellenanlage [F1] .....	41
Abbildung 25 - Ruderanordnung Uboot KI.214 [F1] .....	45
Abbildung 26 - CAD-Beispiel Ruderanlage .....	47
Abbildung 27 - Ruderschaft-Geometrie .....	48
Abbildung 28 - Ankereinrichtung mit innen liegendem Antrieb [P32, S. 98] .....	50
Abbildung 29 - links: Patentanker [www.toplicht.de, 15.01.2010] .....	51
Abbildung 30 - rechts: Danforth-Anker [www.nanaimomarinecentre.com, 15.01.2010] .....	51
Abbildung 31 - außendruckfeste Container [F1] .....	54
Abbildung 32 - Kabelwinde [F1] .....	57
Abbildung 33 - Bereich für Ballistiksenschutz [F1] .....	58
Abbildung 34 - Beschusstest von 1.3964-Platten, links: Vorderseite, rechts: Hinterseite [F1] .....	58
Abbildung 35 - Rettungssysteme [P31 S.121] .....	59
Abbildung 36 - Schotttür: links: Einbau, rechts: CAD [F1] .....	60
Abbildung 37 - Rettungskugel [P31 S.120] .....	61
Abbildung 38 - Druckkörper Forschungstauchboot ALVIN [I6] .....	61
Abbildung 39 - Teleskopierbarer Schacht [F1] .....	63
Abbildung 40 - Ladesystem [F1] .....	64
Abbildung 41 - VW Lupo [www.autoplenum.de 13.07.2010] .....	67
Abbildung 42 - Torpedosektion Tauchboot Typ VII [www.uboot-netz.de, 13.07.2010] .....	69
Abbildung 43 - Waffenlagerungssystem [F1] .....	70

Abbildung 44 - Waffe "IDAS" [I5].....	71
Abbildung 45 - gedocktes Uboot mit sichtbaren Metallhydridspeichern [F1] .....	72
Abbildung 46 - Metallhydridspeicher - CAD [F1] .....	73
Abbildung 47 - Einbauort O2-Speicher [F1] .....	76
Abbildung 48 - CAD-Beispiel Container [F1] .....	76
Abbildung 49 - Rohrbündelwärmetauscher [ASE-Apparatebau GmbH] .....	79
Abbildung 50 - Rohrleitungssystem am Hydraulikblock [F1].....	79
Abbildung 51 - Schema Dieselabgasanlage [P31, S.73] .....	82
Abbildung 52 - Porsche 911-GT2 [www.zcars.com, 17.06.2010] .....	82
Abbildung 53 - Einrichtungsstudie Wohnraum [F1].....	83
Abbildung 54 - Kombüse [F1].....	84
Abbildung 55 - Uboot Kl. 214 [F1] .....	85
Abbildung 56 - Tauchboote SHINKAI + ALVIN [www.mbari.org, www.sstg.org 15.01.2010] .....	86
Abbildung 57 - Übersicht der Signaturen .....	92
Abbildung 58 - Beeinflussung des Erdmagnetfelds [F1] .....	92
Abbildung 59 - Beispiel für Zielmaß [F1] .....	93
Abbildung 60 - Diagramm Reflexionsgrad für eine senkrecht auftreffenden Schallwelle [F1] .....	94
Abbildung 61 - VISBY-Klasse [F1] .....	95
Abbildung 62 - Versuchsaufbau Laserschweißanlage [F5].....	97
Abbildung 63 - Laserschweißnaht-Oberseite + Mikroschliff [F5].....	98
Abbildung 64 - Einfluss der Schnittkante: links:Wasserstrahl, rechts: gefräst [F5].....	98
Abbildung 65 - Schweißergebnisse - links mit, rechts ohne Schutzgasabdeckung [F5].....	99
Abbildung 66 - Porenbildung [F5].....	99
Abbildung 67 - Mikrohärteverteilung in WEZ [F5].....	100
Abbildung 68 - WIG-Decklage [F5].....	100
Abbildung 69 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm [F5] .....	101
Abbildung 70 - Röntgenbild einer Laserschweißnaht [F5] .....	102
Abbildung 71 - Anspengversuch [WTD91].....	106
Abbildung 72 - FEM-Simulation einer Anspengung [F1].....	107
Abbildung 73 - Verformungs-Zeit-Diagramm Anspengung [F1].....	108
Abbildung 74 - Ergebnis der Anspengung [F6] .....	109
Abbildung 75 - Stahl - Lukendeckel für seitlichen Ausstieg [F1] .....	111
Abbildung 76 - Lukendeckel Titan .....	112
Abbildung 77 - FEM-Simulation Titandeckel, links: Spannungen, rechts: Verformung.....	114
Abbildung 78 - Öffnungskräfte Lukendeckel - Vergleich .....	115
Abbildung 79 - Lukendeckel Titan .....	116
Abbildung 80 - Referenzboot JAGO [F1].....	117
Abbildung 81 - FEM-Spannungsanalyse ORCA [F1] .....	118
Abbildung 82 - Forschungstauchboot ORCA - Druckkörper .....	120
Abbildung 83 - Studie: Forschungstauchboot ORCA.....	121
Abbildung 84 - Klasse 212A in schwerer See [F1].....	123

### **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1 - Vergleich von Werkstoffklassen .....	14
Tabelle 2 - Festigkeit/Dichte - Vergleich der Werkstoffklassen.....	15
Tabelle 3 - Vergleich der Verformungen .....	16

Tabelle 4 - Werkstoffübersicht Ti1-Ti4 .....	20
Tabelle 5 - Werkstoffübersicht TiAl6V4 .....	21
Tabelle 6 - Werkstoffübersicht TiAl3V2,5 .....	22
Tabelle 7 - Werkstoffübersicht TiCu2,5 .....	23
Tabelle 8 - Werkstoffübersicht TiAl5Sn2,5 .....	23
Tabelle 9 - Werkstoffübersicht TiV15Cr3Al3Sn3 .....	24
Tabelle 10 - Werkstoffübersicht TiAl4,5V3Mo2Fe2 .....	24
Tabelle 11 - Berechnungsbeispiel Biegeträger .....	29
Tabelle 12 - Vergleichsrechnung Sehrohr .....	36
Tabelle 13 - Propellerwerkstoffe [P28, S.4], [P23, S.901ff.] .....	40
Tabelle 14 - Vergleichsrechnung Propellerwelle .....	43
Tabelle 15 - Vergleich Ruderwerkstoffe .....	46
Tabelle 16 - Vergleichsrechnung Ruderschaft .....	49
Tabelle 17- spezifische Haltekraft verschiedener Ankertypen in N/kg [P32,S.152] .....	51
Tabelle 18 - Vergleichsrechnung Anker .....	53
Tabelle 19 - Berechnungsbeispiel Staubehälter .....	56
Tabelle 20 - Berechnungsbeispiel Kugeldruckbehälter .....	62
Tabelle 21 - Berechnungsbeispiel Druckfeder .....	68
Tabelle 22 - Berechnung Metallhydridspeicher .....	74
Tabelle 23 - Berechnung Sauerstoffspeicher .....	77
Tabelle 24 - Druckkörperwerkstoffe .....	88
Tabelle 25 - Berechnungsbeispiel Druckkörper .....	90
Tabelle 26 - Vorbetrachtung Beultest .....	107
Tabelle 27 - Anspengversuche - Sprengstoffmenge .....	109
Tabelle 28 - Vergleich Lukendeckelvarianten .....	114
Tabelle 29 - Druckkörperdimensionierung ORCA [P37] .....	119

### **Formelverzeichnis**

Formel 1 - Biegelinie: Träger auf zwei Stützen .....	27
Formel 2 - Werkstoffsubstitution für Biegebalken mit gleicher Steifigkeit .....	27
Formel 3 - Biegelinie für Träger auf 2 Stützen .....	27
Formel 4 - Werkstoffsubstitution für Biegebalken mit gleicher Steifigkeit .....	27
Formel 5 - Biegespannung .....	28
Formel 6 - Werkstoffsubstitution für Biegebalken mit Spannungsoptimierung .....	28
Formel 7 - Torsionsspannung .....	28
Formel 8 - Werkstoffsubstitution für Torsionsbalken mit Spannungsoptimierung .....	28
Formel 9 - Eigenfrequenz Biegebalken [P7,S.159ff] .....	36
Formel 10 - Propellerwellendimensionierung [N10 Kap.4 S.4-2] .....	42
Formel 11 - Vergleichsformel Propellerwelle .....	43
Formel 12 - Wellendurchbiegung [P12 S.44] .....	44
Formel 13 - kritische Drehzahl .....	44
Formel 14 - Ruderschaftdurchmesser bei Torsionsbelastung [N10 Kap.2, S.14-4] .....	48
Formel 15 - Vergleichsformel Ruderschaft .....	48
Formel 16 - erforderliche Wandstärke für Kugelbehälter [P36, S.295] .....	62
Formel 17 - Zylinderschale unter Innendruck [N18] .....	74
Formel 18 - Zylinderschale unter Innendruck [N18] .....	77

## **Abkürzungsverzeichnis**

HDW	Howaldtswerke-Deutsche Werft GmbH
BWB	Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung
WIWeB	Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe
WTD	Wehrtechnische Dienststelle des Bundesamts für Wehrtechnik und Beschaffung
BV	Bauvorschrift des Bundesamts für Wehrtechnik und Beschaffung
GL	Germanischer Lloyd
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung

## **Quellen - Publikationen**

- [P1] Peters, M., Leyens, C.: „Titan und Titanlegierungen“, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KG, Weinheim, 2002
- [P2] Holtz, M.: „European Titanium Market – Current and future scenario“, Titania Group, 10.08.2007
- [P3] Wittkowsky, R.: Skript „Korrosion“, Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Nord, 2003
- [P4] DECHEMA - Deutsche Gesellschaft für chemisches Apparatewesen, Chemische Technik und Biotechnologie e.V.: „Dechema-Werkstofftabelle, 40. Ergänzungslieferung“
- [P5] Sándor, F.: „Lehrbrief für die Korrosion“, TU Budapest, 2007
- [P6] Riedl-Narentenau, R.: „Skriptum Korrosionstechnik“, TU Graz, 2007
- [P7] Will, Lämmel: „Kleine Formelsammlung Technische Mechanik“, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 4. Auflage 2007
- [P8] Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, Merkblatt 829 „Edelstahl Rostfrei in Kontakt mit anderen Werkstoffen, Düsseldorf, 2007
- [P9] Titanium Information Group: „Titanium for Offshore and Marine Applications“, 2. Auflage, 1999
- [P10] Titanium Information Group: „Surface Treatment of Titanium“, März 1998
- [P11] Titanium Information Group: „Welding Titanium“, Mai 1999
- [P12] Fischer, Kilgus, Paetzold, Schilling, Heinzler, Näher, Röhrer, Stephan: „Tabellenbuch Metall“, Europa-Lehrmittel-Verlag, 41. Auflage, 1999
- [P13] Brune, E.: „Titan-Schweißtechnik“, Firma PanGas in Degmarsellen (Schweiz), 2005
- [P14] Jost: „Hinweise zum Schweißen von Titan und Titanlegierungen“, Firma R.K. Hufnagel GmbH, 2005
- [P15] Hoffmann Group: „Garant - Handbuch der Zerspanungstechnik“, Stand Oktober 2007
- [P16] Euro-Titan Handels-AG: „Hinweise für die Weiterverarbeitung von Titan“, Stand Oktober 2007
- [P17] Beitz, W. und Grote, K.-H. „Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau“, 20. Auflage, Springer-Verlag, 2001
- [P18] Riedel, R.: Präsentation „Titan“, TU Darmstadt
- [P19] Benfer, S., Siemers, C., Jencus, P., Rösler, J., Fürbeth, W.: „Corrosion properties of a new free machining titanium alloy“, EUROCORR 2008, Edinburgh, UK
- [P20] Bergmann, J.P., Casalini, G., Langenfelder, D., Müller, K.: „Laserschweißen von Titan“, Lehrstuhl für Metallische Werkstoffe, Universität Bayreuth
- [P21] Richter, K.-H.: Präsentation „Fügen von Titanlegierungen“, MTU Aero Engines, 2008

- [P22] Leyens, C. : Präsentation „Oxidation von Titanlegierungen und Schutzschichten“, 2008
- [P23] Boyer,R., Welsch, G., Collins E.W.: “Material Properties Handbook: Titanium Alloys”, 2. Auflage, ASM International, Januar 1998
- [P24] Rösler, J. , Siemers, C. : „Titan und Titanlegierungen“, Technische Universität Braunschweig, Institut für Werkstoffe, 2007
- [P25] Steffens, K.: „Technik der Luftfahrtantriebe“, MTU Aero Engines, 2002
- [P26] Mountford, J.A. : „Titanium - properties, advantages and applications solving the corrosion problems in marine service“, Tico Titanium Inc., New Hudson, 2002
- [P27] Hull, T.W., Kommentar zu “Application of titanium in shipboard seawater cooling systems”, Naval Engineers Journal, Juli 1987
- [P28] Manneck, S.: “Propeller Material used for Submarines”, Ingenieurkontor Lübeck, 1987
- [P29] Wilmes, H., Kolesnikov, B. : „CFK/Titan, ein Hybridwerkstoff zur verbesserten Kopplung von Faserverbundstrukturen“, DLR Institut für Strukturmechanik, Braunschweig, 2002
- [P30] Wen, C.E.: „Fabrication and Characterization of autogenous titanium foams“, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Nagoya, Japan, 2001
- [P31] Gabler, U: “Unterseebootbau”, Bernard & Graebner Verlag, 4. Auflage, Bonn, 1997
- [P32] Henschke, W.: „Schiffbautechnisches Handbuch“, Band 3, 2. Auflage, VEB Verlag Technik Berlin, 1961
- [P33] Minnaar, K.: „High Strain Rate Shear Failure of Metals in High-Speed Machining“, Georgia Institute of Technology, 1997
- [P34] Louvigne, P.: “Final Report of the European Titanium Armour Programme - Ballistic evaluation of low cost titanium”, 2004
- [P35] Bozena, A.: Präsentation B104 - Titanwerkstoffe, www.materialmagazin.com
- [P36] Mayr, M.: „Technische Mechanik: Statik-, Kinematik-, Kinetik-, Schwingungen-, Festigkeitslehre“, Ausgabe 6, Hanser Verlag, 2008
- [P37] Steffens, M.: Masterthesis „Nichtlineare Spannungs- und Beulanalyse des Druckkörpers aus Titan für ein 1000m Forschungstauchboot“, Howaldtswerke-Deutsche Werft GmbH & Fachhochschule Kiel, 2009
- [P38] Flender-Taschenbuch, Flender AG Bocholt, 4. Auflage, März 2005

### **Quellen - Normen**

- [N1] Deutsches Institut für Normung: „DIN EN ISO 8044: Korrosion von Metallen - Grundbegriffe und Definitionen“, November 1999
- [N2] Deutsches Institut für Normung: „DIN 81249: Korrosion von Metallen in Seewasser und Seeatmosphäre“, November 1997
- [N3] Deutsches Institut für Normung: „DIN 50905: Korrosionsuntersuchungen“, Januar 1987
- [N4] Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung: „Bauvorschrift für Schiffe der Deutschen Marine - BV 1050: Erzeugnisse aus metallischen Werkstoffen, Schweißzusätze und Schweißhilfsstoffe, Qualifikation“, Koblenz, Juni 2004
- [N5] ASTM International: “ASTM D 1141 - 75: Standard Specification for Substitute Ocean Water”, 1980
- [N6] Deutsches Institut für Normung: “DIN 17850: Titan - chemische Zusammensetzung“, November 1990

- [N7] Deutsches Institut für Normung: "DIN 17851: Titanlegierungen - chemische Zusammensetzung", November 1990
- [N8] Deutsches Institut für Normung: „DIN 17869: Werkstoffeigenschaften von Titan und Titanlegierungen“, Juni 1992
- [N9] Deutsches Institut für Normung: „DIN EN 910: Zerstörende Prüfung von Schweißnähten an metallischen Werkstoffen“, Mai 1996
- [N10] Germanischer Lloyd: „Bauvorschriften und Richtlinien“, 2009
- [N11] Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung: „VG85521 - Druckkörperdurchführungen für mechanische Fernbedienungseinrichtungen“, Februar 1996
- [N12] ASTM International: „ASTM - B265: Specification for Titanium and Titanium Alloy Strip, Sheet and Plate“, 2007
- [N13] Deutsches Institut für Normung: "DIN 81835: Ankerketten Berechnungsgrundlagen", März 2001
- [N14] International Organization for Standardization: „ISO 1704 - Shipbuilding - Stud-link anchor chains“, März 2008
- [N15] Technischer Ausschuss Europäischer Titanhersteller: "Mikrogefüge-Richtreihe für Platten aus  $\alpha+\beta$ -Titanlegierungen", Juli 1991
- [N16] VdTÜV: „AD2000-Merkblatt B0: Berechnung von Druckbehältern“, November 2008
- [N17] VdTÜV: „AD2000-Merkblatt B6: Zylinderschalen unter äußerem Überdruck“, Oktober 2006
- [N18] VdTÜV: „AD2000-Merkblatt B1: Zylinder- und Kugelschalen unter innerem Überdruck“, Oktober 2000

### **Quellen - Internet**

- [I1] Internetauftritt der BUNDESWEHR, [www.marine.de](http://www.marine.de), 05.06.2010
- [I2] Petra Reich: "Titan - Herstellung und Gewinnung", Universität Bayreuth, 15.02.2004
- [I3] Internetauftritt des Französischen Instituts für Erkundung der Meere, [www.ifremer.fr](http://www.ifremer.fr), 05.06.2010
- [I4] Internetauftritt der THYSSEN KRUPP TITANIUM GMBH, [www.deuschetitan.de](http://www.deuschetitan.de), 22.05.2010
- [I5] Internetauftritt des BUNDESAMTS FÜR WEHRTECHNIK UND BESCHAFFUNG, 13.07.2010
- [I6] Internetauftritt des WOODS HOLE OCEANOGRAPHIC INSTITUTION, 01.05.2009

### **Quellen - Unternehmens- + Institutsverzeichnis**

- [F1] ThyssenKrupp Marine Systems AG  
Howaldtswerke - Deutsche Werft GmbH  
Werftstraße 112-114  
24143 Kiel  
[www.hdw.de](http://www.hdw.de)
- [F2] ThyssenKrupp Titanium GmbH  
Westendstraße 15  
45143 Essen  
[www.deuschetitan.de](http://www.deuschetitan.de)

- [F3] Titanium Information Group  
Swinden House  
Moorgate Road  
Rotherham S60 3AR  
United Kingdom  
[www.titaniuminfogroup.co.uk](http://www.titaniuminfogroup.co.uk)
- [F4] Presse- und Informationszentrum Marine  
Medienarchiv  
Uferstraße  
24960 Glücksburg  
[www.marine.de](http://www.marine.de)
- [F5] Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung  
Fachgruppe V.5  
Unter den Eichen 87  
12205 Berlin  
[www.bam.de](http://www.bam.de)
- [F6] Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung  
Wehrtechnische Dienststelle 91 (WTD91)  
Am Schießplatz  
49716 Meppen  
[www.bwb.org](http://www.bwb.org)



# **Anhang**

**zur Dissertation**

## **Einfluss von Titan auf den Entwurf von Unterwasserfahrzeugen**

von

Dipl.-Ing. Andreas Malletschek

aus

Lutherstadt Wittenberg

2011



# Inhaltsverzeichnis Anhang

I	Chemische und physikalische Eigenschaften.....	1
	I.I Chemische Eingruppierung .....	1
	I.II Kristallstrukturen.....	2
	I.III Gefügestrukturen.....	3
	I.IV Thermomechanische Behandlung.....	6
	I.V Texturen.....	7
	I.VI Reintitan und Titanlegierungen .....	8
	I.VII Verformungsverhalten.....	10
	I.VIII Ermüdungsverhalten .....	13
	I.IX Umformbarkeit.....	15
	I.X Schockresistenz und Schadenstoleranz .....	15
	I.XI Elektrische Leitfähigkeit .....	16
	I.XII Wärmeleitfähigkeit.....	16
	I.XIII Wärmeausdehnung.....	17
	I.XIV Hochtemperaturverhalten .....	17
	I.XV Magnetische Eigenschaften.....	17
	I.XVI Reibverhalten.....	17
	I.XVII Biokompatibilität.....	18
II	Korrosion und Korrosionsschutz.....	19
	II.I Elektrochemische Spannungsreihe .....	19
	II.II Passivität von Reintitan und Titanlegierungen.....	20
	II.III Korrosionsformen und Anfälligkeit von Titanlegierungen.....	21
	II.V Werkstoffvergleiche.....	31
	II.VI Korrosionsschutz.....	32
	II.VII Fazit .....	32
III	Verarbeitung von Titanwerkstoffen .....	33
	III.I Urformverfahren .....	33
	III.II Umformverfahren.....	35
	III.III Trennverfahren .....	36
	III.IV Spanende Verfahren .....	37
	III.V Erodieren von Titan.....	38
	III.VI Oberflächenbehandlung.....	39
	III.VII Fazit .....	41
IV	Fügen von Titanbaukomponenten .....	42
	IV.I Schraubenverbindungen .....	42
	IV.II Stiftverbindungen .....	43
	IV.III Schmelzschweißverbindungen.....	43
	IV.IV Reibschweißverbindungen.....	50

IV.V Lötverbindungen .....	50
IV.VI Klebeverbindungen.....	51
IV.VII DAVEX - Verfahren.....	51
IV.VIII Fazit.....	52
V Verzeichnisse und Quellenangaben.....	53

# I Chemische und physikalische Eigenschaften

## I.1 Chemische Eingruppierung

Das chemische Element Titan (Ti) ist ein silberweiß glänzendes Metall und befindet sich im Periodensystem der Elemente (PSE) in der vierten Hauptgruppe und in der vierten Periode. Es gehört mit seiner Ordnungszahl 22 zu den Übergangsmetallen. In der folgenden Tabelle werden die chemischen Eigenschaften von Titan und Eisen miteinander verglichen:

Tabelle 1 - Chemische + physikalische Eigenschaften

	<b>Titan (Ti)</b>	<b>Eisen (Fe)</b>
<b>Dichte</b>	4507 kg/m <sup>3</sup>	7874 kg/m <sup>3</sup>
<b>Schmelzpunkt</b>	1668 °C (1941 K)	1535°C (1808K)
<b>Siedepunkt</b>	3287°C (3560 K)	2750°C (3023K)
<b>Molares Volumen</b>	10,64 · 10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> /mol	7,09 · 10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> /mol
<b>Schmelzwärme</b>	15,45 kJ/mol	13,8 kJ/mol
<b>Verdampfungswärme</b>	421 kJ/mol	349,6 kJ/mol
<b>Schallgeschwindigkeit</b>	4140 m/s	3200 (trans. <sup>1</sup> ) 5900 (long. <sup>2</sup> )
<b>spezifische Wärmekapazität</b>	520 J/(kg · K)	452 J/(kg·K)
<b>elektrische Leitfähigkeit</b>	2,34 · 10 <sup>6</sup> m/Ω	9,93 · 10 <sup>6</sup> m/Ω
<b>Wärmeleitfähigkeit</b>	21,9 W/(m·K)	80,2 W/(m·K)

Bei diesem Vergleich sind vor allem die großen Unterschiede zwischen den beiden Elementen in den Dichten, sowie den elektrischen und thermischen Leitfähigkeiten zu beachten. Dies spiegelt sich auch in den Eigenschaften der Legierungen wieder.

<sup>1</sup> Transversalwelle: Schwingungsrichtung ist senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle

<sup>2</sup> Longitudinalwelle: Schwingungsrichtung ist gleich der Ausbreitungsrichtung der Welle

## I.II Kristallstrukturen

Titan weist, wie auch andere Metalle, verschiedene Gittermodifikationen in Abhängigkeit von der Temperatur auf. Bis zur Transustemperatur<sup>3</sup> bei ca. 882°C besitzt dieser Werkstoff eine hexagonal dichteste Kugelpackung und wird als  $\alpha$ -Titan bezeichnet. Ab ca. 882°C liegt das  $\beta$ -Titan mit einer kubisch-raumzentrierten Gitterstruktur

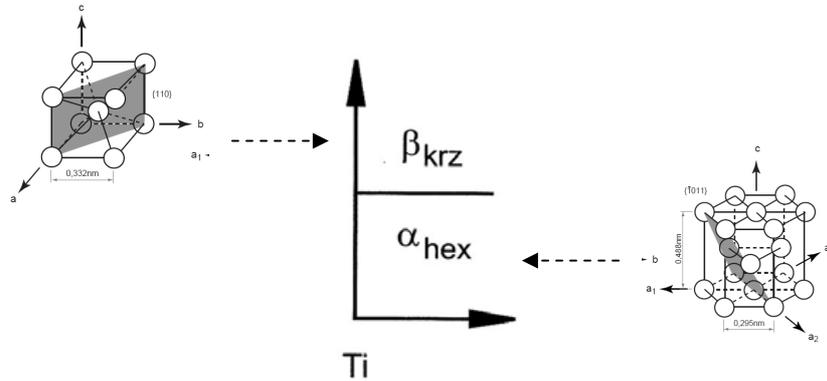


Abbildung 1 - Phasendiagramm Reintitan [P24, S.8]

Durch gezielte Beeinflussung der Kristallstruktur und Hinzufügen von Legierungselementen ist eine große Vielfalt an Materialeigenschaften möglich. Dabei wird unterschieden zwischen  $\alpha$ -stabilisierenden Elementen (Bsp. Al, O, N, C), die die Transustemperatur nach oben, und  $\beta$ -stabilisierenden Elementen (Bsp. V, Fe, Cr, Ni, Mo), die die Transustemperatur nach unten verschieben. Neutrale Legierungselemente wie beispielsweise Zinn oder Zirconium beeinflussen diese jedoch nicht.

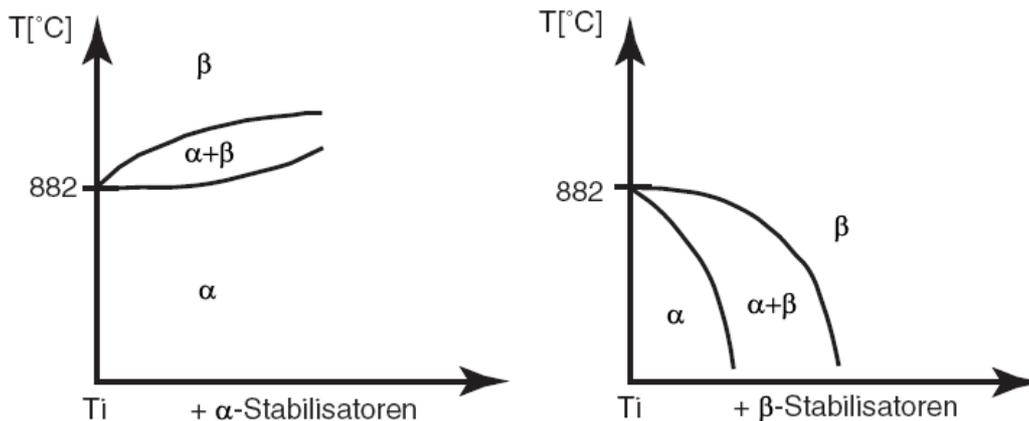


Abbildung 2 - Beeinflussung des Phasendiagramms [P24, S.9]

Die Titanwerkstoffe werden je nach Kristallaufbau nach  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $(\alpha+\beta)$ -Legierungen (siehe auch Anhang „I.III Gefügestrukturen“) klassifiziert, wobei sich folgende Materialeigenschaften zuordnen lassen:

<sup>3</sup> Übergangstemperatur von  $\alpha$ - zu  $\beta$ -Gefüge

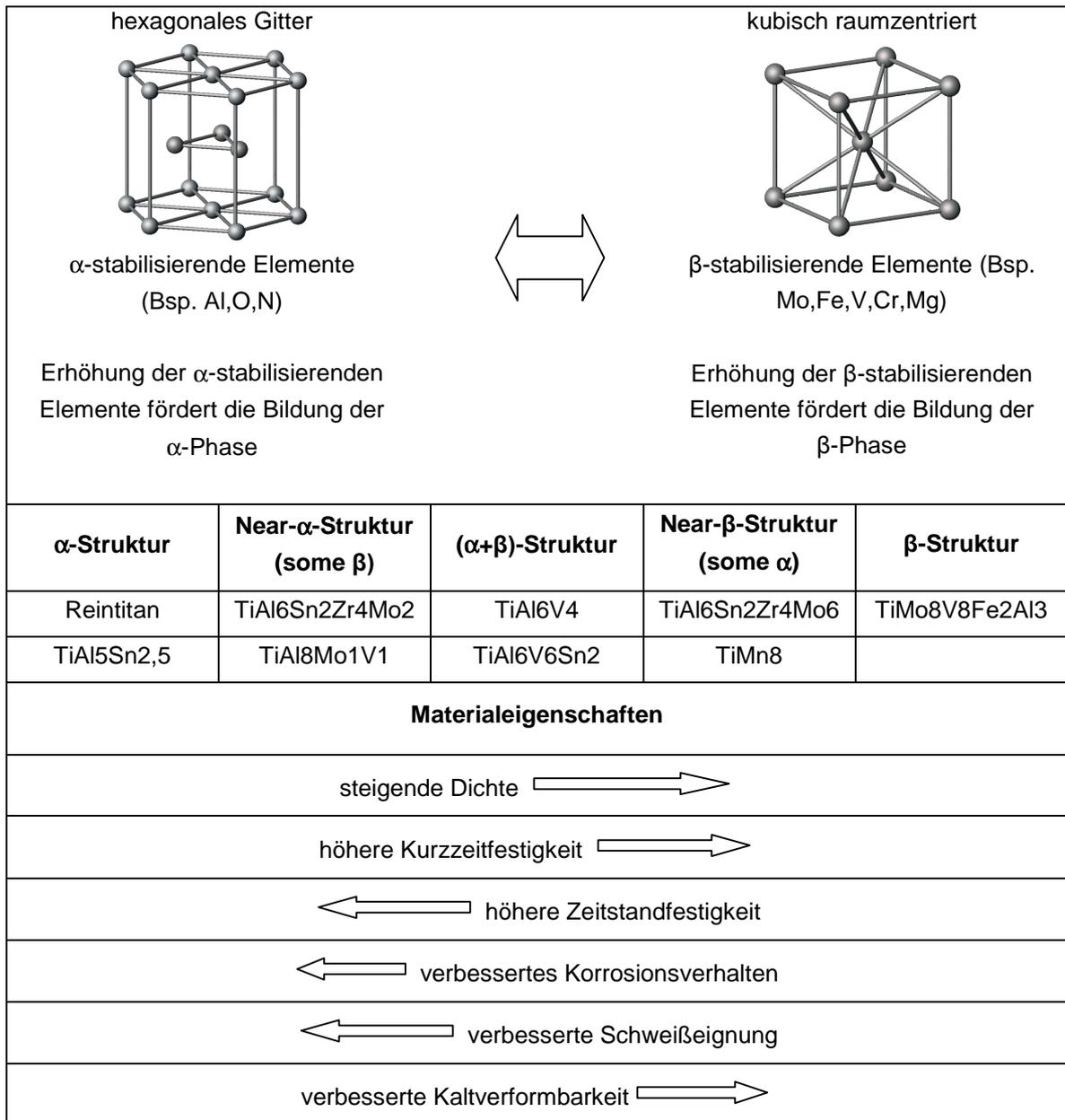


Abbildung 3 - Einteilung der Legierungen aufgrund ihrer Kristallstruktur [P1, S.304]

Beide Kristallstrukturen weisen bedingt durch deren Atomanordnung im Vergleich zur kubisch-flächenzentrischen Struktur von Stählen nur eine verhältnismäßig geringe plastische Verformbarkeit auf. Durch Erhöhung des  $\beta$ -Anteils (krz-Struktur) kann jedoch das Verformungsverhalten deutlich verbessert werden (siehe Anhang „I.X Umformbarkeit“).

### I.III Gefügestrukturen

Die Gefügestrukturen eines Werkstoffs haben erheblichen Einfluss auf dessen mechanische Kennwerte. Bei Titanwerkstoffen können durch die thermomechanische Behandlung die folgenden Gefüge eingestellt werden, wobei je nach Abkühlzeit eine

feine oder grobe Verteilung der einzelnen Phasen erzielt werden kann. Wegen der Komplexität dieses Themas sind an dieser Stelle nur einzelne Merkmale aufgelistet, genaue Aussagen sind beispielsweise in der Literatur [P1] und [P23] zu finden.

### I.III.I Lamellares Gefüge

Das lamellare Gefüge entsteht beim langsamen Abkühlen aus der  $\beta$ -Phase oberhalb der Transustemperatur. Dabei wachsen die Lamellen entlang des Temperaturgradienten vom Kornzentrum zur Korngrenze. Bedingt durch die zwölf möglichen Gleitrichtungen der krz-Gitterstruktur der  $\beta$ -Phase entsteht daraus ein Korbgeflechtgefüge, dessen Korngrößen (grobkörnig, feinkörnig) durch die Variation der Abkühlungsparameter beeinflusst werden kann.

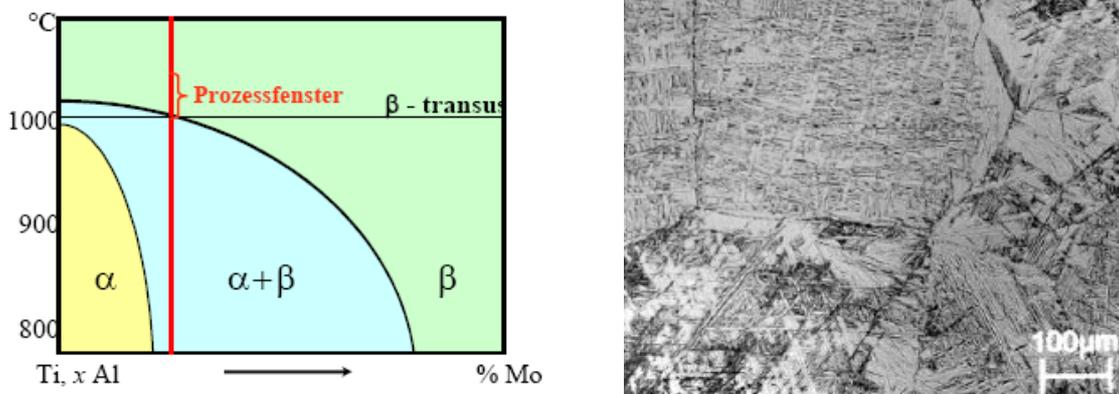


Abbildung 4 - Prozessfenster - lamellares Gefüge [P18, S.31+32]

Der  $\beta$ -Anteil bildet dabei einen schmalen Saum um die  $\alpha$ -Lamellen (schwarzer Korngrenzenbereich im Bild), da dessen Transustemperatur durch die  $\beta$ -stabilisierenden Legierungselemente bis in den Raumtemperaturbereich verlagert wurde.

### I.III.II Globulares Gefüge

Dieses Gefüge ist durch einen globularen Aufbau gekennzeichnet und entsteht durch ein Rekristallisationsglühen im Anschluss an eine hohe Kaltumformung des Vormaterials.

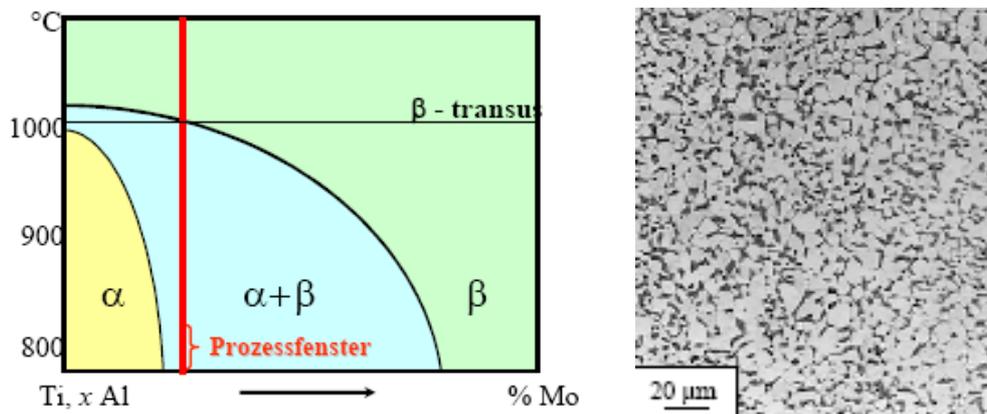


Abbildung 5 - Prozessfenster - globulares Gefüge [P18, S.34]

In diesem Lösungsglühvorgang wird ein rekristallisiertes, globulares Gefüge durch Neuausrichtung der Körner erzeugt, wobei die Steigerung der Glühzeit eine Kornvergrößerung bewirkt.

### I.III.III Martensitisches Gefüge

Beim schnellen Abschrecken aus der  $\beta$ -Phase (über 3000 K/s), oberhalb der Martensit-Starttemperatur entsteht das feinspießige Martensitgefüge.



Abbildung 6 - martensitisches Gefüge von TiAl6V4 [P1, S.15]

Der Härtungseinfluss durch diese Umwandlung ist jedoch im Gegensatz zu Stählen eher gering, da bei Titan keine Zwangslösung von Elementen (Bsp. Kohlenstoff bei Stahlwerkstoffen) erfolgt und somit keine großen Gitterverspannungen auftreten [P1, S.14].

### I.III.IV Bimodales Gefüge

Das bimodale Gefüge entsteht durch Lösungsglühen dicht unterhalb der Transus-temperatur.

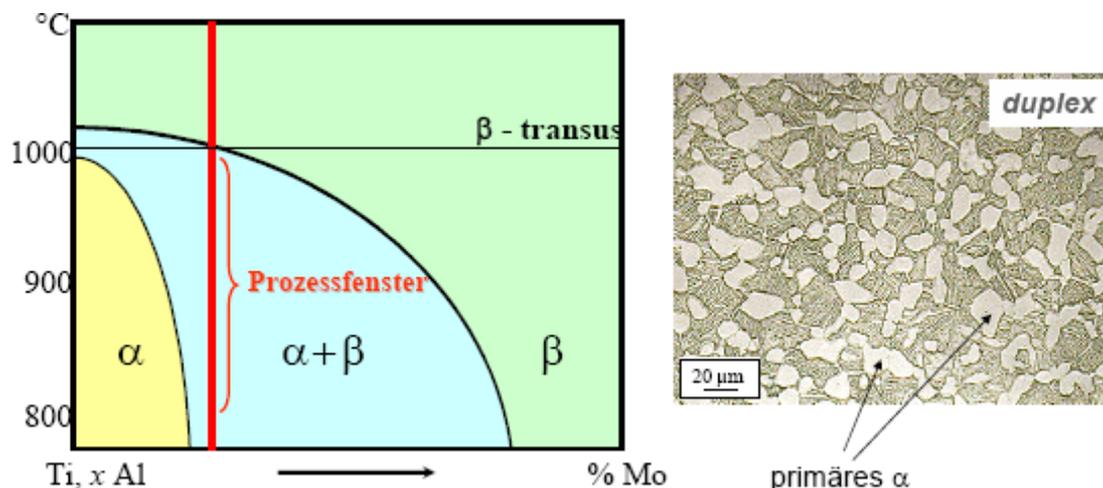


Abbildung 7 - Prozessfenster - bimodales Gefüge [P18, S.35]

Der Gefügeaufbau beinhaltet je nach chemischer Zusammensetzung der Legierung sowohl lamellare als auch globulare Strukturen.

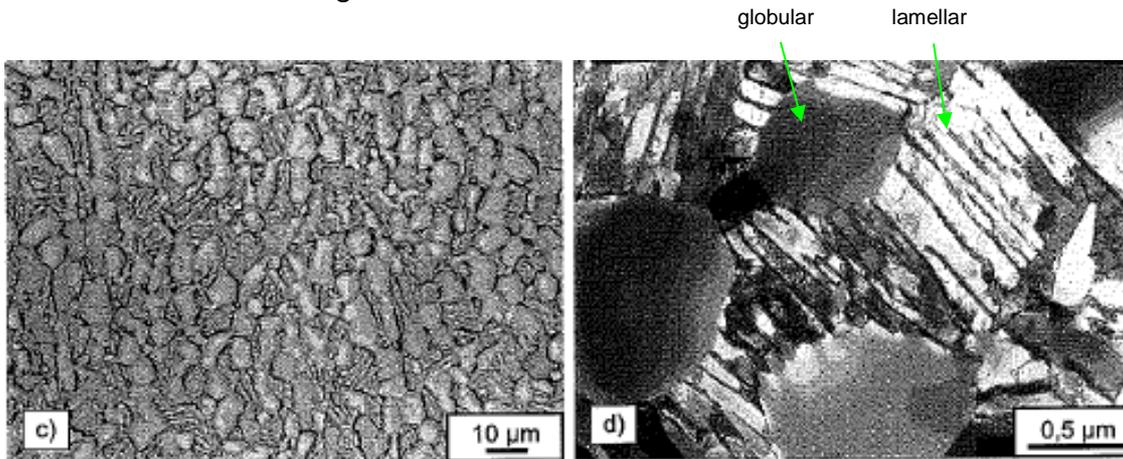


Abbildung 8 - bimodales Gefüge von TiAl6V4 [P1, S.16]

Aufgrund der Kombination von lamellaren und globularen Strukturen, stellt dieses Gefüge eine gute Kombination der gefügebedingten Vor- und Nachteile dar.

### I.III.V Einfluss auf die mechanischen Kennwerte

Die Ausprägung von diversen Gefügestrukturen innerhalb eines Materials hat folgenden Einfluss auf die mechanischen Kennwerte:

Tabelle 2 - Gefügeeinfluss auf die mechanischen Kennwerte [P1, S.13]

<i>fein</i>	<i>grob</i>	<i>Eigenschaft</i>	<i>lamellar</i>	<i>globular</i>
0	0	E-Modul	0	+/- (texturabhängig)
+	-	Festigkeit	-	+
+	-	Duktilität	-	+
-	+	Bruchzähigkeit	+	-
+	-	Rissbildung	-	+
-	+	Rissausbreitung	+	-
-	+	Zeitstandfestigkeit	+	-
+	-	Superplastizität	-	+
+	-	Oxidationsverhalten	+	-

+ = Verbesserung, 0 = keine Veränderung, - = Verschlechterung

Es ist zu erkennen, dass durch die Gefüge unterschiedliche Eigenschaften erzeugt werden können. Das Material kann deshalb, ähnlich wie beim Stahl, mittels entsprechende thermomechanischer Behandlung anwendungsspezifisch beeinflusst werden.

### I.IV Thermomechanische Behandlung

Die thermomechanische Behandlung von Titanwerkstoffen dient zur gezielten Einstellung der Gefügestruktur und somit auch der Werkstoffeigenschaften, die durch

die Größe und Anordnung der  $\alpha$ - und  $\beta$ -Phasen bestimmt werden. Im Detail beinhaltet dies Lösungsglüh-, Verformungs-, Rekristallisations-, Auslagerungs- und Spannungsfreiglühverfahren.

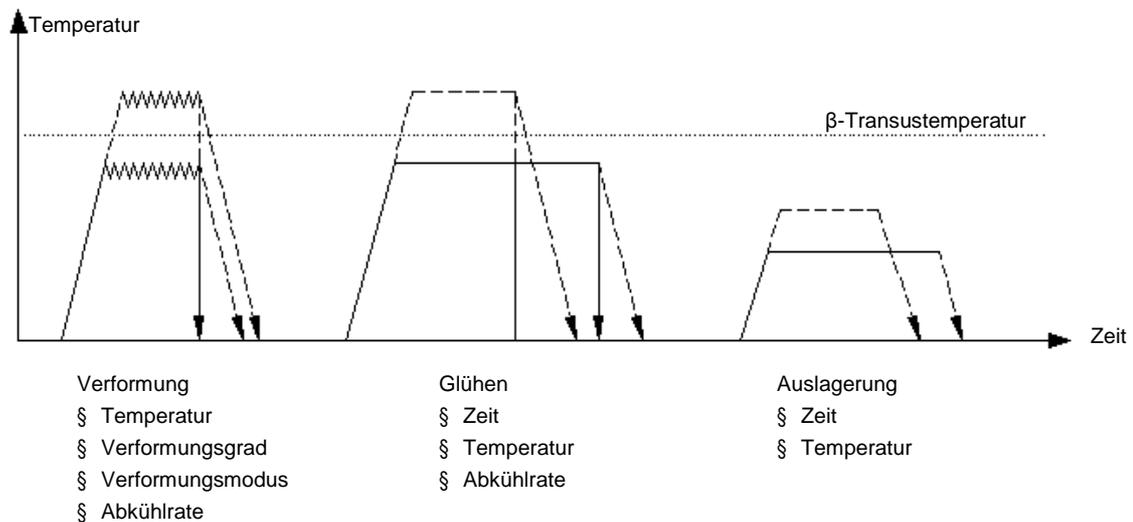


Abbildung 9 - Beispiel für Thermomechanische Behandlung [P1, S.13]

Bei den Wärmebehandlungsverfahren wird zwischen folgenden Verfahren unterschieden:

- § Spannungsglühverfahren zur Reduzierung der Gefügespannungen infolge von Umformungs-, Bearbeitungs- und Schweißprozessen
- § Rekristallisationsglühen zur Erhöhung der Verformbarkeit durch Bildung eines (fein-)globularen Gefüges
- § Duplex-Glühen zur Erzeugung eines bimodalen Gefüges mittels zwei Glühvorgängen bei unterschiedlichen Temperaturen (1x lamellares Gefüge erzeugen, 1x globulares Gefüge erzeugen)
- §  $\beta$ -Glühen zur Vermeidung von  $\alpha$ -Gefüge durch schnelles Abkühlen aus der  $\beta$ -Phase unterhalb der Martensit-Starttemperatur
- § Lösungsglühverfahren zum Lösen von Gefügeausscheidungen, beispielsweise die beim Abkühlprozess übrig gebliebenen  $\beta$ -Phasen oder Martensit
- § Auslagerung im Bereich von 400-600°C zur Ausscheidung der  $\beta$ -Phase und damit Steigerung der Festigkeiten, jedoch auch Reduzierung der Bruchdehnung

Aufgrund der Beeinflussung mehrerer Werkstoffeigenschaften wird das Wärmebehandlungsverfahren immer gezielt auf die jeweilige Anwendung ausgerichtet.

## I.V Texturen

Titanwerkstoffe können im Gegensatz zu den gebräuchlichen Stahl- und Aluminiumwerkstoffen teils stark anisotrope Eigenschaften aufweisen, was sich hauptsächlich

durch die Anordnung der hexagonalen Gitterstruktur im Material begründet. Die Texturen entstehen durch die Umformung in Abhängigkeit vom Umformgrad, -modus und Temperatur und können durch den Rekristallisationsvorgang verstärkt werden.

**Bei der Auswahl der Titanlegierung ist deshalb immer der anwendungsspezifisch ungünstigere Kennwert auszuwählen. Dies ist außerdem bei der Festlegung der Verarbeitungsprozesse zu berücksichtigen.**

### ***1.VI Reintitan und Titanlegierungen***

Bedingt durch die vielfältigen Anforderungen der Technik an die eingesetzten Materialien, existiert auch bei Titan ein breites Spektrum an Rein- bzw. Legierungswerkstoffen, deren Zusammensetzung nach [N6] bzw. [N7] festgelegt ist. Häufig werden diese jedoch nach dem ASTM-International-Standard<sup>4</sup> mit Grad 1 bis 4 (Reintitan) bzw. 5 bis 35 (Titanlegierungen) bezeichnet. In der folgenden Tabelle sind einige, industriell wichtige Legierungen aufgeführt (siehe Tabelle „Reintitan und Titanlegierungen“).

Der Zusatz ELI steht für „extra low interstitials“ kennzeichnet Legierungen mit niedrigem Anteil an eingelagerten Fremdatomen wie beispielsweise Stickstoff, Eisen und Sauerstoff. Dadurch steigt die Duktilität bei gleichzeitigem Abfall der Festigkeit aufgrund der geringeren Gitterverspannungen.

#### ***Anmerkung:***

Die angeführten Materialkennwerte sind sowohl aus Normen als auch aus Herstellerkatalogen entnommen. Entsprechende Wärmebehandlungsverfahren während des Herstellungsprozesses können diese Werte teilweise deutlich beeinflussen. Vor dem Einsatz des jeweiligen Materials ist deshalb unbedingt der Hersteller zu kontaktieren.

---

<sup>4</sup> früher: American Society for Testing and Materials, heute: ASTM International

I Chemische und physikalische Eigenschaften

Tabelle 3 - Reintitan und Titanlegierungen [N12], [P1, S.20 ff.]

ASTM-grade	Werkstoff	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Dehngrenze [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Bruchdehnung [%]	Schweißbarkeit	Bemerkungen
1	Ti1	4,52	138	240	24	sehr gut	hohe Korrosionsbeständigkeit, gute Schweißbarkeit, sehr gute Verformbarkeit, sehr gute Verfügbarkeit
2	Ti2	4,52	275	345	20	sehr gut	wie Ti1, etwas höhere Festigkeit, sehr gute Verfügbarkeit
3	Ti3	4,52	380	450	18	gut	wie Ti1, etwas höhere Festigkeit, gute Verfügbarkeit
4	Ti4	4,54	483	550	15	gut	höchste Festigkeit von unlegiertem Titan, gute Verfügbarkeit
5	TiAl6V4	4,43	828	895	10	mittel	Am weitesten verbreitete, hochfeste und vergütbare Titanlegierung, gut schmiedbar, gute Bruchzähigkeit, sehr gute Verfügbarkeit
6	TiAl5Sn2,5	4,49	793	828	10	sehr gut	schweißbare Legierung mittlerer Festigkeit, gute Warmfestigkeit und Temperaturstabilität, vergütbar, gut schmiedbar
9	TiAl3V2,5	4,49	483	620	15	gut	gute Kaltverformbarkeit, gute Verfügbarkeit
12	TiMo0,3Ni0,8	4,52	345	483	18	gut	---
19	TiAl3V8Cr6Zr4Mo4	4,82	759	793	15	mittel	sehr gute Kaltverformbarkeit
21	TiMo15Nb3Al3Si0,2	4,93	759	793	15	nicht bekannt	---
23	TiAl6V4-ELI	4,43	759	828	10	mittel	wie TiAl6V4 mit erhöhter Bruchzähigkeit
---	TiAl6V6Sn2	4,54	965	1034	8	begrenzt	hochfeste Legierung, gut schmiedbar
---	TiV10Fe2Al3	4,65	862	931	20	mittel	gut durchvergütbare, hochfeste Legierung, sehr gutes Ermüdungsverhalten, sehr gute Kombination von Streckgrenze zu Bruchzähigkeit, gut schmiedbar
---	TiAl6Zr2Sn2Mo2Cr2Si0,25	4,65	1138	1276	11	sehr schlecht	hohe Festigkeit, gute Härbarkeit
---	TiAl6Sn2Zr4Mo2Si0,1	4,55	830	900	8	mittel	Hochtemperaturlegierung bis ca. 520°C
---	TiAl4,5V3Mo2Fe2	4,52	972	1023	19	nicht bekannt	gute Festigkeit, hohe Bruchdehnung, gute Kaltverformbarkeit
---	TiV15Cr3Al3Sn3	4,77	986	993	22	gut	sehr gute Kaltverformbarkeit, hohe Festigkeit + hohe Bruchdehnung
---	TiFe4,5Mo6,8Al1,5	4,8	1350	1420	10	nicht bekannt	günstige Legierung, Anwendung als Federwerkstoff

## I.VII Verformungsverhalten

Die Verläufe in den Spannungs-Dehnungsdiagrammen unterscheiden sich teilweise deutlich zwischen den verschiedenen Titanwerkstoffen, wobei außerdem der Herstellungsprozess mit den verschiedenen Wärmebehandlungsverfahren einen großen Einfluss auf den Kennlinienverlauf besitzt.

### I.VII.1 Zug-Dehnungs-Verhalten

Innerhalb der Legierungsklassen weisen die verschiedenen Werkstoffe aufgrund der Vielzahl an möglichen Legierungselementen ein großes Spektrum an Festigkeitskennwerten von ca. 200 bis weit über 1000 N/mm<sup>2</sup> auf. Reintitanwerkstoffe besitzen nur eine geringe Festigkeit aber eine hohe Duktilität und hochlegierte Werkstoffe (Bsp. TiFe4,5Mo6,8Al1,5) eine hohe Festigkeit in Verbindung mit einer geringen Verformbarkeit. In der folgenden Abbildung wird das Verhalten von unterschiedlichen Stählen mit Titanwerkstoffen qualitativ verglichen:

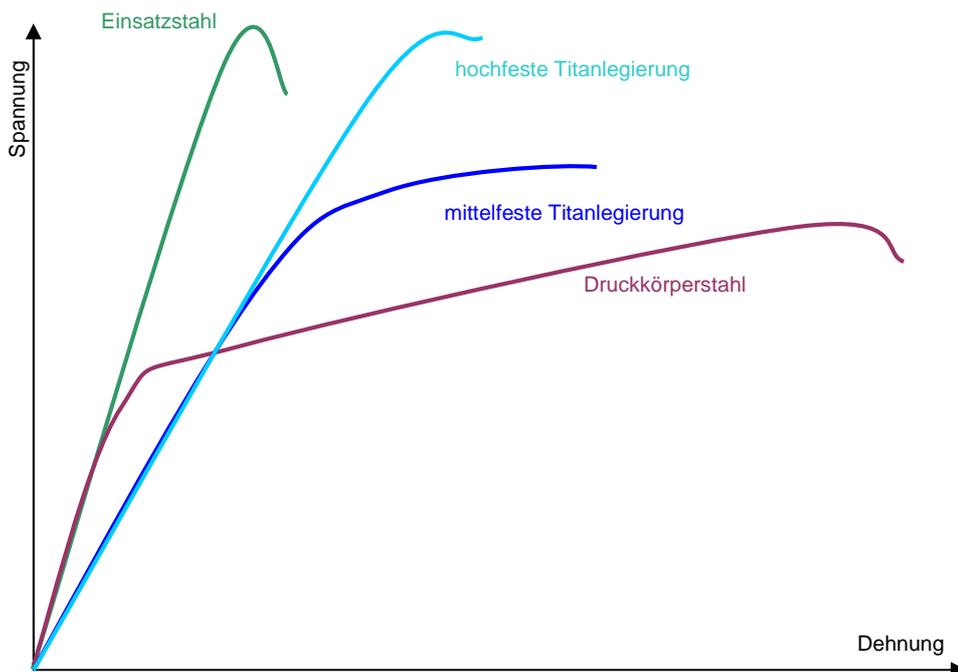


Abbildung 10 - qualitativer Werkstoffvergleich Zug-Dehnungskurven

Auffällig bei allen Titanwerkstoffen ist das relativ geringe Verhältnis der Zugfestigkeit zur Dehngrenze, woraus eine flach verlaufende Kennlinie zwischen diesen beiden Kennwerten resultiert. Eine betriebsbedingte Überschreitung der Dehngrenze ist deshalb zu vermeiden. Eine allgemeine Aussage über die Gleichmaßdehnung ist bedingt durch die Vielseitigkeit der Kurvenverläufe in Abhängigkeit von Werkstoff und thermomechanischer Behandlung nicht möglich und ist somit spezifisch zu ermitteln.

### I.VII.II Druck-Stauchungs-Verhalten

Das Verhalten von Titanwerkstoffen unter Druckbelastung weist ebenfalls ein sehr breites Spektrum an möglichen Kurvenverläufen in Abhängigkeit vom jeweiligen Werkstoff und dessen thermomechanischer Behandlung auf. Im Folgenden werden die Druck-Stauchungs-Kurven von Titan qualitativ mit denen von Stahl verglichen:

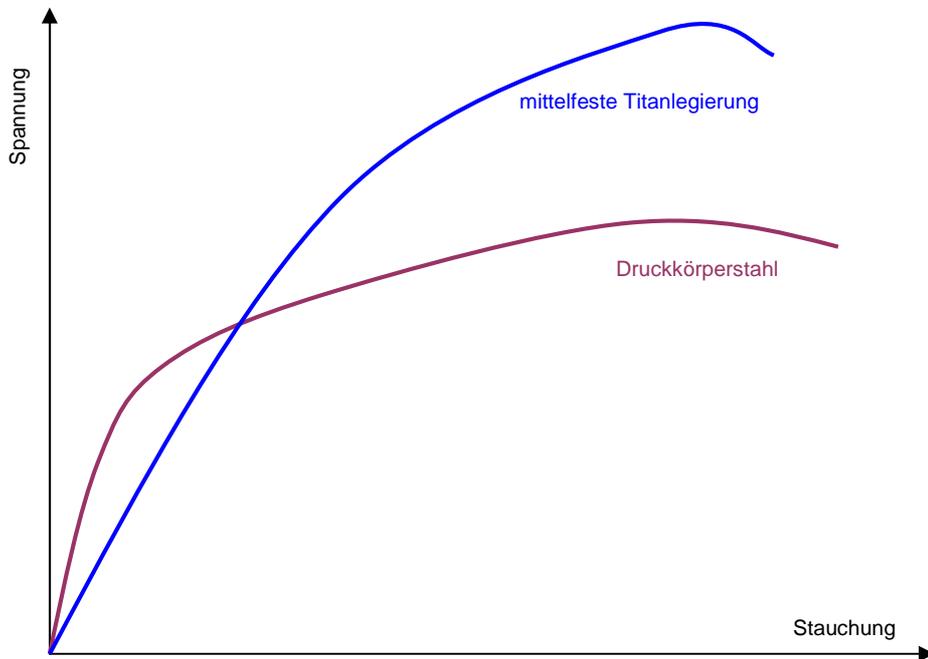


Abbildung 11 - qualitative Druck-Stauchungskurven

***Im Vergleich zu den in der Meerestechnik üblichen Edelstählen, besitzen die mittel- und hochlegierte Titanwerkstoffe deutlich höhere Druckfestigkeiten ( $1.3964 R_{p0,2} = 470 \text{ MPa}$ ), was besonders für druckfeste Unterwasseranwendungen interessant ist.***

### I.VII.III Elastizitätsmodul, Poissonzahl

Titanwerkstoffe besitzen einen deutlich geringeren Elastizitätsmodul als Stähle und dadurch, bei gleichen Belastungen und gleichem Flächenmoment, eine erhöhte Verformung. Ebenfalls ist die starke Anisotropie der Gefügestrukturen in Abhängigkeit von der Walzrichtung zu berücksichtigen, die je nach Zusammensetzung des Werkstoffs und Blechstärke zwischen 5 bis 20 Prozent (bei kleinen Blechstärken) betragen kann. Bei der Auslegung von tragenden Strukturen ist somit immer der jeweils ungünstigere Wert zu verwenden.

Der Elastizitätsmodul von Reintitan und Titanlegierungen unter Druckbelastung liegt im Bereich des jeweiligen E-Moduls unter Zugbelastung bzw. leicht darüber (siehe [P23, S.95]). In der folgenden Auflistung sind die Elastizitätsmodule im Vergleich zu anderen Werkstoffen dargestellt:

Tabelle 4 - E-Modul + Poissonzahl [P17, S. E102]

Werkstoff	Elastizitätsmodul E bei [GPa]				E-Modul / Dichte bei 20°C [GPa*cm <sup>3</sup> /g]	Poissonzahl $\mu$ bei 20°C
	20°C	200°C	400°C	600°C		
<i>Titanlegierungen</i>	104...130	99...113	88...93	77...80	26	0,32...0,38
<i>ferritische Stähle</i>	211	196	177	127	27	0,3
<i>austenitische Stähle</i>	196	186	174	157	25	0,3
<i>Aluminiumlegierungen</i>	60...80	54...72	---	---	26	0,33

Die genauen Werte für den E-Modul und die Poissonzahl sind den entsprechenden Werkstoffdatenblättern des jeweiligen Herstellers zu entnehmen. Bezieht man diese Elastizitätsmodule auf die Dichte, so liegen alle Werkstoffe im gleichen Bereich. Durch gezielte Beeinflussung der Bauteilquerschnitte zur Verringerung der Verformung können daher selbst mit dem Einsatz von Titan die geringen Verformungen wie von Stahl erreicht werden. Die Zweckmäßigkeit dieser Maßnahme ist jedoch anwendungsbezogen zu beurteilen.

#### I.VII.IV hochdynamisches Verformungsverhalten

Das hochdynamische Verformungsverhalten von Titanwerkstoffen ist sowohl für die Verarbeitung (Zerspanung) als auch für das Schockverhalten interessant. In der nachfolgenden Abbildung sind Vergleichskurven für das Werkstoffverhalten unter hohen Geschwindigkeiten dargestellt:

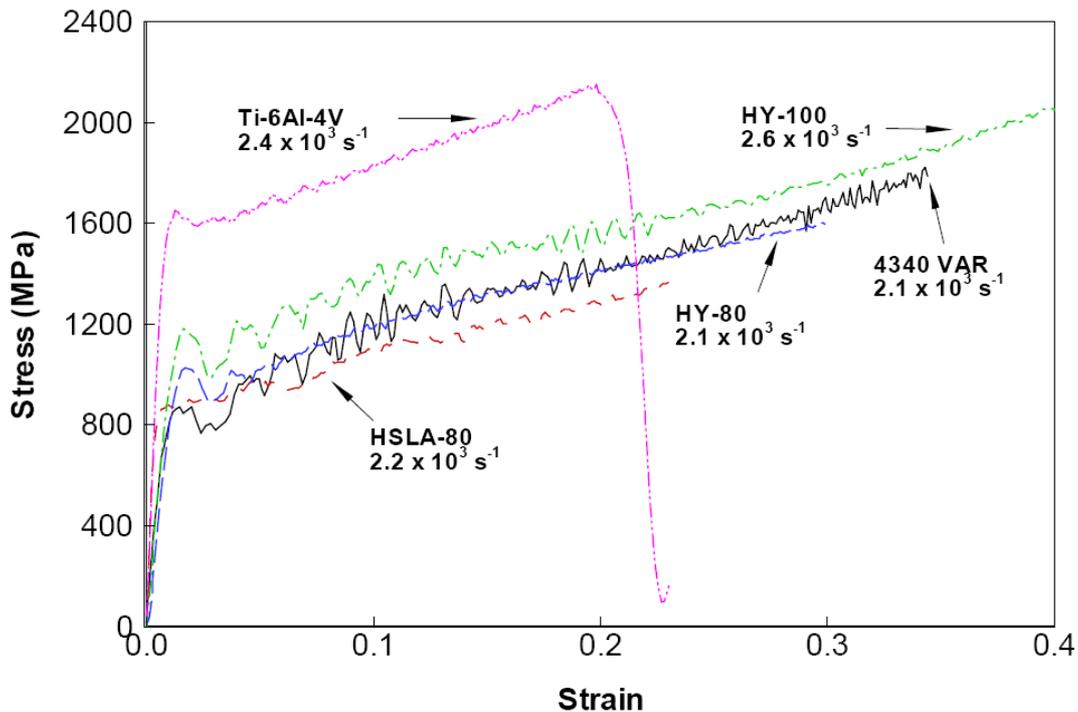


Abbildung 12 - Hochgeschwindigkeitsverformung [P33 S.15]

Aus diesem Diagramm ist ersichtlich, dass der Werkstoff TiAl6V4 eine höhere ertragbare Dehngrenze, aber auch eine geringere Duktilität als die üblichen Schiffbaustähle HY80 oder HY100 besitzt. Eine allgemeingültige Interpretation bezüglich der praktischen Anwendung in schockkritischen Komponenten kann jedoch nicht getroffen werden, da diese Kurven sehr stark von der Geschwindigkeit abhängig sind. Die Werkstoffeigenschaften unter Hochgeschwindigkeitsverformung sind somit für jeden Anwendungsfall genau zu analysieren.

### **I.VII.V Kriechverhalten**

Die in der Meerestechnik vorkommenden Temperaturbereiche sind in der Regel im Bereich von  $-20^{\circ}\text{C}$  bis  $+70^{\circ}\text{C}$  definiert. Für diese niedrigen Temperaturen sind Kriecherscheinungen bei Titanwerkstoffen kaum zu beobachten [P9, S.7], da dieses durch das lamellenförmige Gefüge und die hohen erforderlichen Diffusionskräfte in der  $\alpha$ -Phase weitestgehend verhindert wird. Die besten Kriecheigenschaften weisen deshalb  $\alpha$ - Gefüge auf, gefolgt von  $(\alpha+\beta)$ - Strukturen.

Für den Einsatz von Titan in kritischen Komponenten (Bsp. Druckkörper) ist dennoch ein entsprechender Nachweis der verwendeten Legierung erforderlich.

### ***I.VIII Ermüdungsverhalten***

Die Gesamtlebensdauer eines Bauteils setzt sich aus der Lebensdauer bis zur Rissbildung und der Lebensdauer für die Rissausbreitung zusammen. Dabei haben Ermüdungsversuche an Titanlegierungen gezeigt, dass bei hohen Spannungs- oder Dehnungsamplituden die Lebensdauer bis zur Rissbildung sehr geringe Werte annehmen kann. Demnach sind beim Einsatz von Titanwerkstoffen in schwingungsbeanspruchten Bauteilen die entsprechenden Werte für die Dauerschwingungsfestigkeit der Wöhlerkurven zu berücksichtigen. Diese Kurven sind stark von der Gefügestruktur und der Oberflächenbehandlung abhängig [P1, S.164], so dass bei der Bauteildimensionierung entweder auf entsprechend hohe Sicherheiten zu achten ist oder die genauen Kennwerte beim jeweiligen Werkstofflieferanten anzufragen sind.

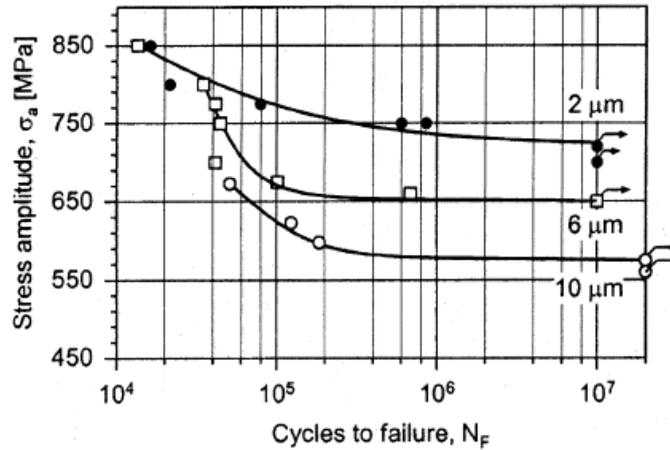


Abbildung 13 - Dauerschwingverhalten TiAl6V4 in Abhängigkeit von der  $\alpha$ -Korngröße [P1 S.169]

In der folgenden Tabelle sind die Dauerfestigkeiten ausgesuchter Werkstoffe aufgeführt:

Tabelle 5 - Dauerschwingfestigkeiten [P1 S.169ff.], [P17 S. E104], [P23 S.278]

Werkstoff	Dehngrenze [N/mm <sup>2</sup> ]	Dauerschwingfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
Ti 2	276	138
Ti 4	483	242
<b>TiAl3V2,5</b>	<b>483</b>	<b>320</b>
<b>TiAl6V4</b>	<b>827</b>	<b>560</b>
TiAl3V8Cr6Mo4Zr4	1103	420
TiV10Fe2Al3	862	590
St52	355	230
C40	460	295
42CrMo4	900	495
34CrNiMo4	1000	540
<b>HY80</b>	<b>550</b>	<b>333</b>
<b>X2CrNiMnMoNb 21 16 5 3 (1.3964)</b>	<b>430</b>	<b>250</b>

Aus dieser Tabelle ist ersichtlich, dass trotz der teilweise geringen Dauerfestigkeiten von Titanwerkstoffen die Werte dennoch im Bereich der Vergütungsstähle liegen bzw. diese noch übertreffen. Für eine weitere Steigerung der Dauerschwingfestigkeiten [P1, S.183 f.] können folgende Maßnahmen durchgeführt werden:

- § Verringerung der Oberflächenrauheit
- § Einbringen von Druckeigenspannungen in die Oberfläche durch Kaltverfestigung (Bsp. Rollieren, Walzen, Kugelstrahlen)
- § Verringerung der Eigenspannungen mittels Spannungsfreiglühen

Dabei ist zu beachten, dass die Oberflächenbehandlung auf die jeweiligen Legierungstypen  $\alpha$ ,  $\beta$  oder  $\alpha+\beta$  abzustimmen ist [P1, S.193].

### I.IX Umformbarkeit

Die Kaltumformbarkeit ist unmittelbar an die Gitterstruktur und die Gefügezusammensetzung der verschiedenen Titanwerkstoffe geknüpft. Demzufolge weisen vor allem die „weichen“ Reintitanwerkstoffe und die Betalegierungen mit der kubisch-raumzentrischen Gitterstruktur eine gute Kaltumformbarkeit auf (siehe „Tabelle 3 - Reintitan und Titanlegierungen [N12], [P1, S.20 ff.]“). Die  $\alpha$ - und  $(\alpha+\beta)$ -Legierungen sind aufgrund ihrer hohen Festigkeiten und geringen Duktilität nur bei hohen Temperaturen gut umformbar [P1, S.18]. Im folgenden Diagramm sind die Festigkeitskennwerte für TiAl6V4 in Abhängigkeit vom Umformgrad dargestellt:

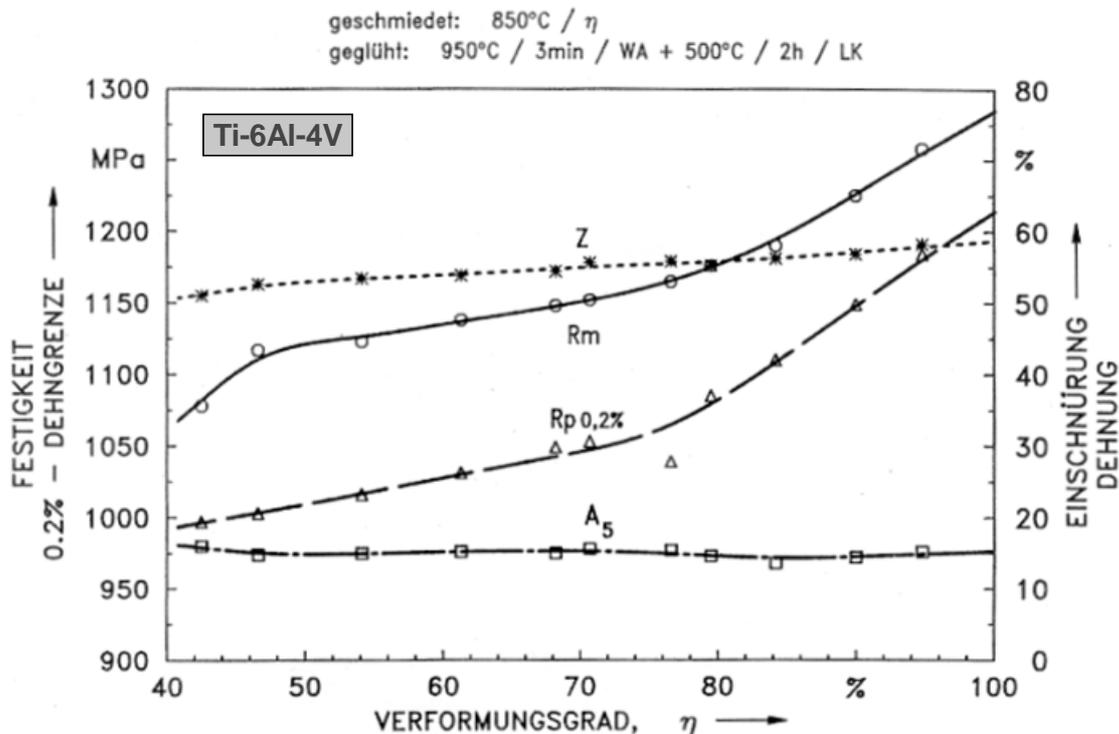


Abbildung 14 - Zugeigenschaften in Abhängigkeit vom Verformungsgrad [P22, S.35]

Darin ist zu erkennen, dass die Festigkeiten mit steigendem Umformgrad anwachsen, aber die Bruchdehnung konstant bleibt. Diese Kaltverfestigung bei gleichbleibender Duktilität ist jedoch nicht allgemeingültig und somit für jeden Werkstoff inklusive thermomechanischer Behandlung individuell zu bestimmen.

### I.X Schockresistenz und Schadenstoleranz

Aufgrund des relativ niedrigen E-Moduls und der daraus resultierenden hohen Materialflexibilität besitzen Reintitan und Titanlegierungen eine hohe Schockresistenz und Schadenstoleranz [P9 S.7], [P26 S.6]. In [P27 S.122] wurde eine Berechnungsformel für die Schockfestigkeit von Materialien dargestellt, die anhand der Faktoren Dichte, E-Modul und Zugfestigkeit eine Aussage über die Schockbeständigkeit liefert:

Tabelle 6 - Schockresistenz verschiedener Werkstoffe [P27 S.122-124]

Werkstoff	Schockwiderstands-Faktor [10 <sup>3</sup> in. / sec.]
TiAl3V2,5	1,306
Aluminium 5086	0,771
Edelstahl A106-B	0,288
Kupfer-Nickel-Legierung 70-30	0,184

Aus dieser Tabelle ist ersichtlich, dass beispielsweise TiAl3V2,5 bei dieser Betrachtung die ca. 4,5-fache Schockbeständigkeit eines rostfreien Stahls besitzt.



Abbildung 15 - Ansprennung einer Korvette [F4]

Eine Aussage über die tatsächliche Schockbeständigkeit und demzufolge auch über die Einsatzmöglichkeit auf militärischen Über- und Unterwasserfahrzeugen kann jedoch nur durch mittels einer Ansprengrprüfung im Rahmen der Werkstoffzulassung erfolgen.

### ***I.XI Elektrische Leitfähigkeit***

Die elektrische Leitfähigkeit liegt bei Titanwerkstoffen im Bereich von 0,5 (Legierungen) bis 2,1  $\text{m}\cdot\Omega^{-1}\cdot\text{mm}^{-2}$  (Reintitan) und ist somit mit denen von Edelstahl vergleichbar. Für die Dimensionierung von Schiffskomponenten ist dieser Wert jedoch nur von geringer Bedeutung, da stromführende Kabel nicht aus Titanwerkstoffen sind.

### ***I.XII Wärmeleitfähigkeit***

Die Wärmeleitfähigkeit liegt bei Titanwerkstoffen im Bereich von 6 (Legierungen) bis 22 W/mK (Reintitan).

### ***I.XIII Wärmeausdehnung***

Der Wärmeausdehnungskoeffizient beträgt bei Titanlegierungen 8 bis  $10 \cdot 10^{-6}/K$  und liegt damit deutlich unter denen vergleichbarer Edelstähle (13 bis  $17 \cdot 10^{-6}/K$ ). Besonders im Schiffbau ist dieser Werkstoffparameter bei der Dimensionierung von Bauteilstrukturen enorm wichtig, da aufgrund des großen Temperaturbereichs ( $-30^{\circ}C$  bis  $+70^{\circ}C$ ) und der großen Bauteilabmessungen die Spannungen (infolge der Längenänderung) enorm hoch werden können. Auch für das Schweißen der Bleche und der daraus resultierenden Wärmenachbehandlung ist dieser Wert besonders zu beachten. **In Komponenten aus Titan sind die Spannungen infolge von Temperaturänderungen geringer als bei herkömmlichen Stahlbauteilen.**

### ***I.XIV Hochtemperaturverhalten***

Titanwerkstoffe besitzen eine hohe Affinität zur Aufnahme von Sauerstoff-, Wasserstoff und Stickstoffionen aus der Umgebung. Bei Raumtemperatur stellt dieses Verhalten kein Problem dar, da die entsprechenden Aktivierungsenergien für diese Reaktionen nicht erreicht werden. Sobald jedoch die Temperaturen auf  $300-400^{\circ}C$  anwachsen, kommt es zur Einlagerung von Fremdatomen in den oberflächennahen Schichten. Dies führt zu Gitterverspannungen und somit zur Versprödung des Werkstoffs. Demzufolge sind die herkömmlichen Titanwerkstoffe bei hohen Temperaturen nicht verwendbar. Eine effektive Lösung für dieses Problem bilden die Titanaluminide, die sich derzeit in der Entwicklung befinden. Wegen der relativ niedrigen Temperaturbereiche in der Meerestechnik, der noch unvollständigen Entwicklung und der hohen Preise dieser Werkstoffe, werden diese in der Dissertation nicht betrachtet.

### ***I.XV Magnetische Eigenschaften***

Als „antimagnetisch“ werden Werkstoffe bezeichnet, deren relative magnetische Permeabilität kleiner gleich 1,01 H/m [N4, S.1-36] ist. Bei Titanwerkstoffen liegt dieser Wert deutlich darunter, so dass sie als „antimagnetisch“ zu klassifizieren sind. Demzufolge ist der Einsatz von Reintitan und Titanlegierungen sehr interessant für den Militärschiffbau, da dort vor allem amagnetische Werkstoffe zum Schutz gegen Magnetminen eingesetzt werden.

### ***I.XVI Reibverhalten***

Titanwerkstoffe besitzen aufgrund ihrer ausgeprägten Oxidschicht einen sehr hohen Reibwert zwischen 0,6 bis 1,0. Beim gleitenden Kontakt zweier Werkstoffoberflächen wird dadurch zunächst die Oxidschicht aufgebrochen und bei hohen Normalkräften tritt ein Metall-Titankontakt auf, **dessen Adhäsionskräfte auch zum Fressen und**

**damit zum Bewegungsstopp führen können.** Diese Materialeigenschaft hat deshalb erheblichen Einfluss auf die Verarbeitung (Bsp. Gewindeschneiden), das Fügen (Bsp. Schrauben) und die Anwendung (Bsp. Gleitführungen) von Komponenten aus Titan.

### ***I.XVII Biokompatibilität***

Titanwerkstoffe besitzen eine hervorragende Biokompatibilität, was sie wiederum bestens eignet für den Einsatz im Lebensmittelbereich und in der Medizintechnik. Beim Einsatz im Meerwasser begünstigt diese Materialeigenschaft jedoch auch die Ansiedlung von Lebewesen auf der blanken Titanoberflächen und somit die Belagbildung. Bei dauerhaft im Meerwasser eingesetzten Komponenten ist deshalb eine Anti-Fouling-Beschichtung zu empfehlen.

## II Korrosion und Korrosionsschutz

In diesem Kapitel werden die Korrosionseigenschaften von Titanwerkstoffen im Hinblick auf den Einsatz in der Seewasserumgebung detailliert untersucht und bewertet.

### II.1 Elektrochemische Spannungsreihe

Die Gleichgewichtspotentialdifferenz der elektrischen Doppelschicht an der Phasengrenze zwischen Elektrode und Elektrolyt ist ein Maß für die Korrosionsanfälligkeit eines Metalls in dem jeweiligen Elektrolyten. Diese Potentialdifferenz ist jedoch allein nicht messbar, so dass sie in Bezug zu einer genormten Standardwasserstoffelektrode nach folgendem Versuchsaufbau elektrisch vermessen wird:

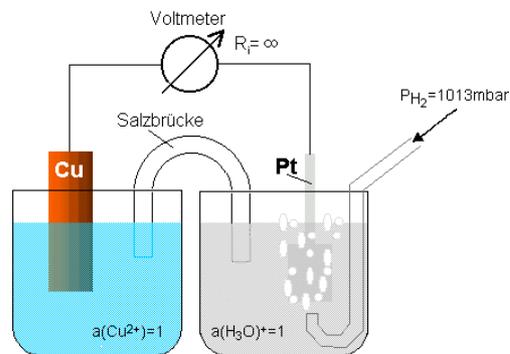


Abbildung 16 - Messaufbau Spannungsreihe [www.chemgapedia.de, 15.06.2010]

Die ermittelten Potentialdifferenzen der verschiedenen Metalle werden in einer elektrochemischen Spannungsreihe mit dem Bezugspotential von 0V für die Wasserstoffelektrode aufgetragen. In der folgenden Tabelle sind die Standardpotentiale für Metalle in einer pH-neutralen Lösung, bei einer Temperatur von 25°C und einer Ionenkonzentration von 1mol/l aufgezeigt:

Tabelle 7 - Elektrochemische Spannungsreihe

Element	Reaktionsgleichung	Standardpotential
Platin	$\text{Pt} \rightleftharpoons \text{Pt}^{2+} + 2\text{e}^-$	+1,20V
Silber	$\text{Ag} \rightleftharpoons \text{Ag}^+ + \text{e}^-$	+0,80V
Kupfer	$\text{Cu} \rightleftharpoons \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^-$	+0,34V
Wasserstoff	$\text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	0V
Eisen	$\text{Fe} \rightleftharpoons \text{Fe}^{3+} + 3\text{e}^-$	-0,04V
Eisen	$\text{Fe} \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,41V
Zink	$\text{Zn} \rightleftharpoons \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,76V
Titan	$\text{Ti} \rightleftharpoons \text{Ti}^{3+} + 3\text{e}^-$	-1,21V
Aluminium	$\text{Al} \rightleftharpoons \text{Al}^{3+} + 3\text{e}^-$	-1,66V
Titan	$\text{Ti} \rightleftharpoons \text{Ti}^{2+} + 2\text{e}^-$	-1,77V
Magnesium	$\text{Mg} \rightleftharpoons \text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^-$	-2,38V

edel  
↑  
↓  
unedel

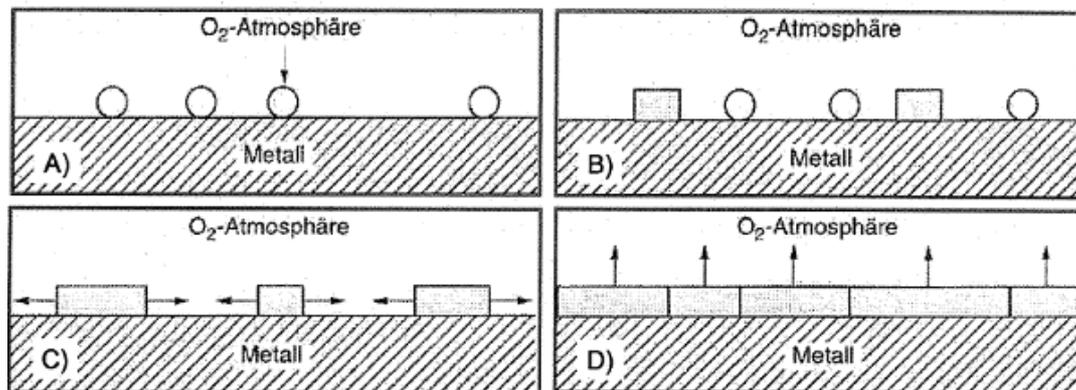
In dieser Tabelle ist zu erkennen, dass sich reines Titan ohne Oxidschicht in der Testlösung sehr unedel verhält und somit eine Integration von Titan in einem galvanischen Element höchstwahrscheinlich zur Korrosion der Titanelektrode führen würde. In der Praxis jedoch ist die Aussagefähigkeit dieser Standardpotentiale in Bezug auf Korrosion beim Einsatz von Werkstoffen in der Meerwasserumgebung aus folgenden Gründen begrenzt:

1. Die Meerwasserumgebung besitzt andere Elektrolyteigenschaften (Metallionenkonzentration, pH-Wert, Temperatur).
2. Die hohe Passivität der Titanwerkstoffe in der Meerwasserumgebung wird in diesen Standardwerten nicht betrachtet.

Eine Aussage zum Korrosionsverhalten von Titan in der Seewasserumgebung ist somit aus dieser elektrochemischen Spannungsreihe **NICHT ENTNEHMBAR**. Dies ist nur mit einer Messung in einer realen Umgebung möglich, in der die jeweiligen Werkstoffe in der Meerwasserumgebung in Relation zu einer Bezugselektrode vermessen und in den so genannten praktischen Spannungsreihen aufgetragen werden. Nur mit diesen praktischen Spannungsreihen ist eine Aussage zum Korrosionsverhalten der jeweiligen Material-Elektrolyt-Paarung möglich.

## II.II Passivität von Reintitan und Titanlegierungen

Titan ist ein sehr reaktives Metall, welches in Anwesenheit von Sauerstoff eine sehr stabile und bei Verletzung selbstheilende Oxidschicht ausbildet.



- A) Adsorption von Sauerstoff an der Werkstoffoberfläche  
 B) Keimbildung  
 C) laterales Keimwachstum  
 D) Wachstum der kompakten Oxidschicht

Abbildung 17 - Oxidschichtbildung [P22, S.8]

Diese Oxidschicht behindert den Ionenaustausch zwischen der Metalloberfläche und dem Seewasser, was zu einer deutlichen Herabsetzung der Korrosionsgeschwindigkeit führt.

### **II.III Korrosionsformen und Anfälligkeit von Titanlegierungen**

Titan zählt zu den Materialien, die eine sehr widerstandsfähige Passivschicht ausbilden (siehe Anhang "II.II Passivität von Reintitan und Titanlegierungen"). Dennoch kann auch bei Titan und dessen Legierungen unter bestimmten Randbedingungen Korrosion auftreten. In den folgenden Punkten werden häufig auftretende Korrosionsarten beschrieben und die Anfälligkeit von Titanlegierungen in Seewasserumgebung bewertet.

#### **II.III.I Gleichmäßige Flächenkorrosion**

Diese Korrosionsart ist durch einen gleichmäßigen, auf die gesamte Oberfläche ausgedehnten Materialabtrag gekennzeichnet. Die Ursache dafür ist die ungenügende chemische Beständigkeit des Materials gegenüber dem umgebenden Medium (Bsp. blanker Baustahl in Meerwasserumgebung).

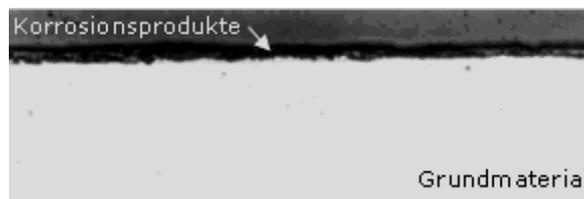


Abbildung 18 - Flächenkorrosion [12]

Da dieser Vorgang sehr gut berechenbar ist, kann durch die Werkstoffauswahl während der Konstruktionsphase mit einem entsprechenden Korrosionsschutz die Flächenkorrosion vermindert werden.

Reintitan und Titanlegierungen bilden eine äußerst widerstandsfähige Passivschicht aus, so dass auch bei dauerhaftem Seewasserkontakt eine hervorragende Beständigkeit gegen Flächenkorrosion in der Meerwasserumgebung ohne zusätzlichen Korrosionsschutz bereits gegeben ist [P4, S.120]. Dieses Verhalten bleibt auch bei höheren Temperaturen unverändert.

#### **II.III.II Muldenkorrosion**

Die Muldenkorrosion ist eine Form der Flächenkorrosion, wobei die unterschiedlichen Materialabtragungsgeschwindigkeiten aus den örtlichen Inhomogenitäten im Elektrolyten oder Werkstoff resultieren.



Abbildung 19 - Muldenkorrosion [12]

Auch Reintitan und Titanlegierungen können anfällig gegen diese Korrosionsart sein, insofern Fremdeinschlüsse bei der Herstellung (Bsp. Gießen) und Verarbeitung des Materials entstehen. Zur Reduzierung dieses Risikos wird eine räumlich getrennte Bearbeitung dieser Werkstoffe, ähnlich wie bei Baustahl und Edelstählen, empfohlen.

### II.III.III Lochkorrosion

Bei dieser Korrosionsart ist der Abtragungsprozess nur auf einen sehr kleinen Bereich der Metalloberfläche begrenzt. Die Ursache dafür sind Chlorid-, Bromid- oder Jodid-Ionen, die Oxid-Ionen aus der Passivschicht verdrängen und somit einen Konzentrationsunterschied in der Oxidschicht ausbilden. Dabei können Chloridionen bereits in geringer Konzentration zur Lochkorrosion führen, speziell wenn sie im Oberflächenbereich vorhanden sind. Als Folge treten Unterhöhungen der Oberfläche aus, die bei ausreichender Tiefe zum Bauteilversagen führen können.

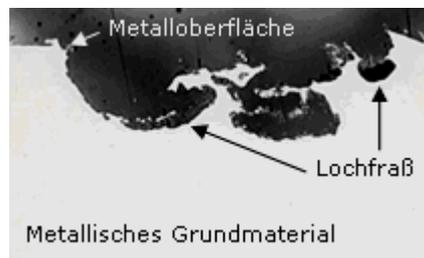


Abbildung 20 - Lochkorrosion [I2]

Aufgrund des Einsatzes der Titanwerkstoffe im Meerwasser und der damit vorhandenen Chloridionen in der Umgebung der Bauteile sind sowohl die Materialauswahl als auch ein entsprechender Korrosionsschutz unabdingbar, zumal die Expositionszeit bedingt durch die hohe Lebensdauer sehr lang ist.

Für Titan- und Titanlegierungen existiert derzeit keine Berechnungsformel für die Wirksumme für Loch- oder Spaltkorrosionsbeständigkeit, wie sie beispielsweise von Stählen bekannt ist.

$$\text{Wirksumme} = \% \text{ Cr} + 3,3 \times \% \text{ Mo} + 30 \times \% \text{ N}$$

Formel 1 – Wirksumme für austenitische, nichtrostende Stähle (Anteil Mo>3%) sowie Nickel-Basislegierungen [N2]

Die Beständigkeit von Reintitan kann jedoch aus dem folgenden Diagramm entnommen werden, in dem die Anfälligkeit von Titan in Abhängigkeit von Temperatur und Salzgehalt des Meeres dargestellt ist:

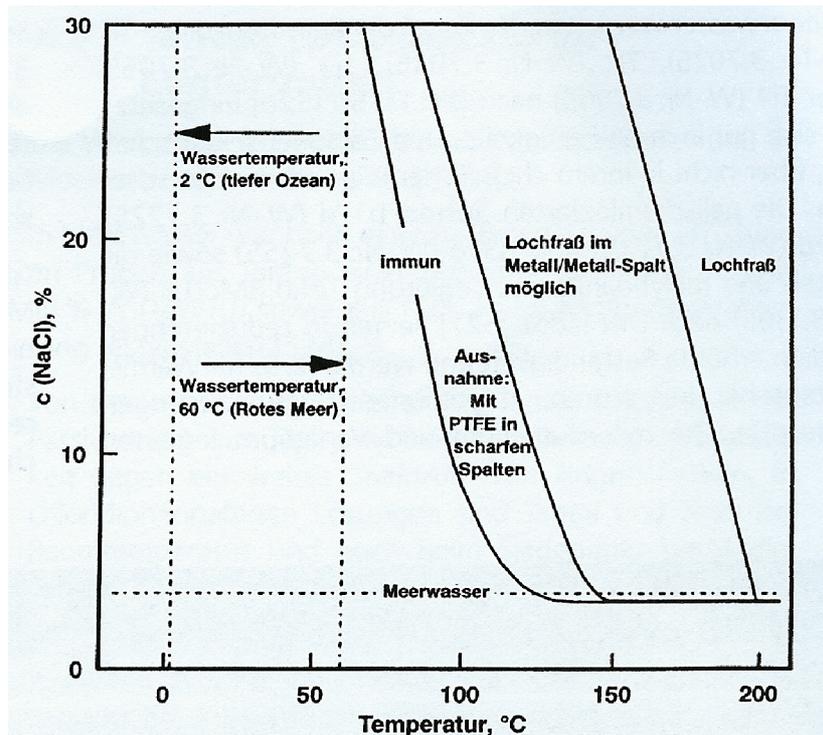


Abbildung 21 - Anfälligkeit von Titanlegierungen gegen Loch- + Spaltkorrosion [P4, S.122]

Aus diesem Diagramm ist ersichtlich, dass Titan bei normalen Wassertemperaturen unempfindlich gegen Loch- und Spaltkorrosion ist. Lediglich bei erhöhten Temperaturen können Loch- und Spaltkorrosion auftreten. Um die Grenztemperatur für Spaltkorrosion zu erhöhen (auf ca. 200°C) ist das Hinzulegieren von Palladium oder Ruthenium erforderlich, was jedoch wegen der hohen Legierungszuschläge den Materialpreis deutlich erhöht und somit Spezialanwendungen in hochkorrosiven Umgebungen vorbehalten.

### II.III.IV Spaltkorrosion

Die Spaltkorrosion ist ein örtlich verstärkter Materialabtrag an den Wänden und bevorzugt am Grund des Spaltes. Dabei tritt diese Korrosion sowohl an Materialrisen als auch an konstruktiv bedingten Spalten (Bsp. Flansch-, Schrauben-, Stift- und Schweißverbindung) auf. Besonders kritisch sind dabei Spaltbreiten im Bereich von 0,1 bis 1mm. Die Ursache dafür ist, dass Sauerstoffatome bei entsprechender Geometrie nicht bis auf den Grund diffundieren können und somit ein Konzentrationsunterschied im Elektrolyten vorliegt.

Auch die Anfälligkeit gegenüber Spaltkorrosion ist unter den Standardbedingungen für Seewasser bei Reintitan und Titanlegierungen aufgrund der beständigen Passivschicht als unkritisch zu bezeichnen [N2]. Die Grenztemperatur für Spaltkorrosion liegt zwischen ca. 80°C [P1, S.496] und 120°C [P4, S.122]. Für den Einsatz an temperaturkritischen Stellen (Bsp. Abgasarmaturen von Verbrennungsmotoren) sind

ebenfalls Palladium- (Bsp. TiPd<sub>0,05</sub> = 250°C) oder Ruthenium-Legierungen (Bsp. TiAl<sub>6</sub>V<sub>4</sub>O<sub>0,1</sub>Ru<sub>0,1</sub> = 250°C) zu verwenden [P1, S.496].

### II.III.V Kontaktkorrosion

Bei der Kontaktkorrosion (auch „galvanische Korrosion“ genannt) sind unterschiedliche Werkstoffe elektrisch leitend miteinander verbunden und befinden sich in einer gemeinsamen Elektrolytlösung. Dadurch wird ein galvanisches Element gebildet und es erfolgt ein korrosiver Angriff auf das unedle Metall (siehe elektrochemische Spannungsreihe).

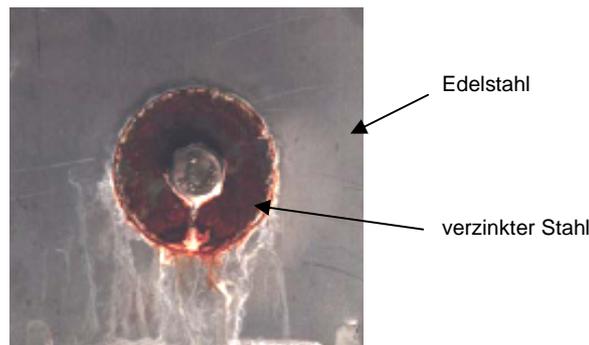


Abbildung 22 - Beispiel für galvanische Korrosion [P8 S.12]

Mit einem Elektrodenpotential von +0,4 bis +0,55V [N2] liegt Titan im Bereich der nichtrostenden Stähle (siehe Anhang „II.V.I Werkstofftabelle“). Das Auftreten von Kontaktkorrosion ist deshalb bei einer Kombination dieser Werkstoffe sehr unwahrscheinlich [P4, S.124] [P9, S.21]. Bei einer galvanischen Verbindung zu unedleren Werkstoffen ist eine Kontaktkorrosion hingegen sehr wahrscheinlich.

#### BEACHTEN:

Bei der Kombination von Titan mit einem deutlich unedlen Metall ist das Auftreten einer Wasserstoffversprödung an der Titan-Kathode möglich.

### II.III.VI Wasserstoffversprödung

Ein Sondereffekt der Kontaktkorrosion ist die Wasserstoffversprödung, die bei der Kopplung von Titan mit einem sehr unedlen Werkstoff an der Titan-Kathode auftreten kann. Der Grund dafür ist die hohe Korrosionsgeschwindigkeit (Bsp. Magnesiumfläche in Kontakt mit relativ großer Titanfläche), die zu einer hohen Wasserstofffreisetzung an der Kathode führt. Dieser Wasserstoff lagert sich in der Gitterstruktur des Titans an und führt, ähnlich wie bei der Kontamination von Schweißverbindungen, zu einer Versprödung und somit zu einer Herabsetzung der Duktilität. Bei der Kombination von Titan mit sehr unedlen Materialien ist deshalb eine Beschichtung zur Vermeidung von hohen Korrosionsgeschwindigkeiten empfehlenswert.

### II.III.VII Interkristalline Korrosion

Bei der interkristallinen Korrosion, auch „selektive Korrosion“ genannt, werden unedle Gefügebestandteile (Bsp. Legierungselemente) aus dem Werkstoff entlang der Korngrenzen herausgelöst. Die Ursache dafür ist die lokale Ausbildung von galvanischen Elementen im Gefüge des Werkstoffs.

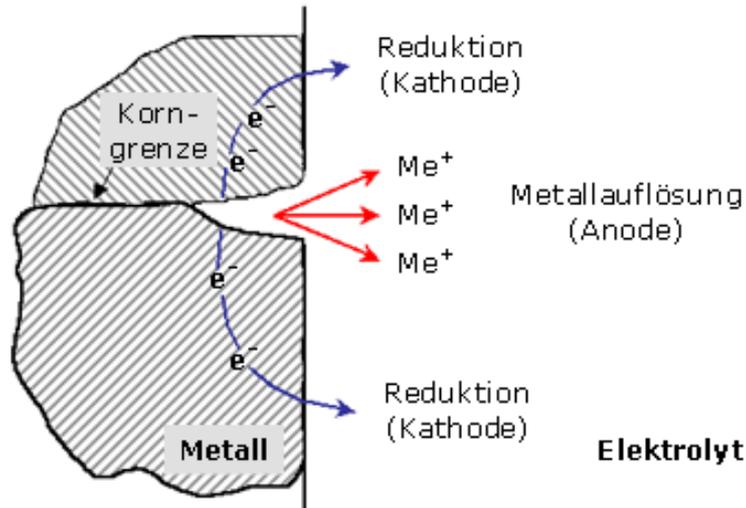


Abbildung 23 - Interkristalline Korrosion [13]

Im Bereich von Schweißnähten wird diese Korrosionsart häufig beobachtet, da es dort zu einer Gefügeänderung infolge des thermischen Einflusses des Schweißens kommt (Bsp: Chromkarbidausscheidungen bei legierten Stählen).

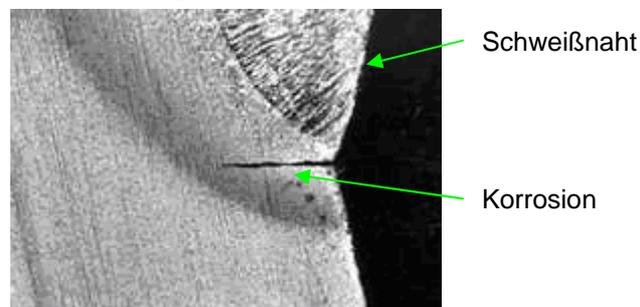


Abbildung 24 - Interkristalline Korrosion [12]

Reintitan und Titanlegierungen sind wegen Passivierung an der Schweißnaht beständig gegen interkristalline Korrosion [N2]. Dies haben Versuche an längsgeschweißten Rohren, Wärmetauschern und Kondensatoren mit einer Betriebszeit von ca. 10 Jahren gezeigt [P4, S.122].

### II.III.VIII Korrosion unter Ablagerungen

Diese Korrosionsart tritt vorwiegend in stagnierenden oder langsam fließenden Gewässern auf (Bsp. Hafenwasser). Dabei lagern sich Mikroorganismen auf den Werkstoffoberflächen an, die anfänglich nur einen Film, im Laufe der Zeit jedoch auch einen starken Bewuchs ausbilden können.



Abbildung 25 - Bewuchs an Schiffskomponenten [F1]

Bei dieser Korrosionsart überlagern sich drei Einzelvorgänge:

1. Die Korrosion wird nicht durch die direkte Wechselwirkung zwischen Metall und Mikroorganismus bewirkt, sondern durch deren Stoffwechselprodukte. Diese beeinflussen die Anteile von kathodischer und anodischer Teilreaktion und somit auch lokal das Korrosionsverhalten. Ein Auftreten von Flächen-, Mulden-, Loch-, und Spaltkorrosion ist deshalb auch bei sonst unkritischen Werkstoffen möglich.
2. Unter den Ablagerungen existiert ein Sauerstoffkonzentrationsgefälle. Ein Auftreten von Spaltkorrosion zwischen Werkstoffoberfläche und Ablagerung ist demnach möglich.
3. Die Ablagerungen behindern den Kontakt zwischen Elektrolyten und Werkstoff, so dass sie als Schutzschicht auch korrosionshemmend wirken können, speziell bei Erosionskorrosion.

Aufgrund des möglichen weltweiten Einsatzes von meerestechnischen Komponenten und der somit nicht näher spezifizierbaren Ablagerungen, ist eine theoretische Vorhersage der Anfälligkeit von Reintitan und Titanlegierungen gegenüber dieser Korrosionsart nicht möglich. Laut [P4, S.120] ist jedoch das Risiko für lokale Korrosion unter Ablagerungen für diese Werkstoffe sehr gering. Für dauerhaft im Meerwasser befindliche Komponenten wird wegen der unbekanntem Ablagerungen dennoch eine Anti-Fouling-Beschichtung empfohlen, zumal Ablagerungen häufig auch funktionsbehindernd sind.

### II.III.IX Wasserlinienkorrosion

Diese Korrosionsart findet an der Phasengrenze zwischen Metall, Luft und Meerwasser statt, wobei dies sowohl die Wasserlinie am Schiffsrumpf oder im Tank als auch die Umrisslinie an einem Wassertropfen auf der Metalloberfläche sein kann.

Der Grund dafür ist das starke Sauerstoffkonzentrationsgefälle im Elektrolyten in unmittelbarer Nähe zur Phasengrenze zwischen Umgebungsluft und Elektrolyt.

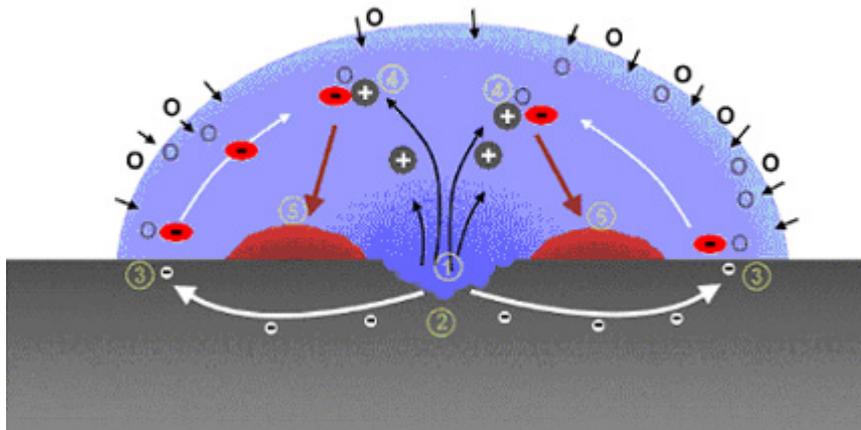


Abbildung 26 - Korrosion am Wassertropfen [13]

Im anodischen Bereich (2) des galvanischen Elements diffundieren Metallionen in den Wassertropfen (1). Am Rand des Wassertropfens (3) wird ein kathodischer Bereich aufgrund der hohen Sauerstoffkonzentration ausgebildet. Dort findet die Kathodenreaktion der Sauerstoffkorrosion unter Bildung von Hydroxidionen statt. Diese verbinden sich mit Wasser und den Metallionen zu Metalloxidhydrat (4). Die Folge dieser Korrosionsart sind linienförmige Kerben direkt unter einer konstanten Wasserlinie (Bsp. in einem Tank).

Die Wasserlinienkorrosion ist besonders gefährlich für offen liegende Metalloberflächen an Schiffsrümpfen. Bei längeren Hafentiegezeiten (Bsp. Marineschiffe), dem daraus resultierenden gleichmäßigen Tiefgang und besonders hohem Sauerstoffkonzentrationsgefälle (durch sauerstoffarmes Hafengewasser) wird dieser Effekt noch verstärkt.

Reintitan und Titanlegierungen sind unter normalen Bedingungen unempfindlich gegen Korrosion in der Spritzwasser-, Wecheltauch- und Dauertauchzone [P4, S.120]. Der Prüfnachweis für die Wecheltauchzone nach [N3] beinhaltet dabei den Test auf Wasserlinienkorrosion.

Titanwerkstoffe gelten deshalb als unempfindlich gegenüber Wasserlinienkorrosion.

**Generell ist jedoch eine Beschichtung von freiliegenden Titanoberflächen im Außenschiff und in Meerwassertanks zu empfehlen, um sowohl der Wasserlinienkorrosion als auch Bewuchs am Schiffsrumpf vorzubeugen.**

### II.III.X Spannungsrissskorrosion

Die Spannungsrissskorrosion ist gekennzeichnet durch korrosiven Angriff des Metalls in Kombination mit oberflächennahen Zugspannungen durch Eigenspannungen oder äußere Kräfte. Man unterscheidet dabei zwischen zwei Arten: der anodischen und der kathodischen Spannungsrissskorrosion.

Bei der **anodischen Spannungsrissskorrosion** entstehen Risse durch Zugspannungen im Material (Eigenspannungen oder äußere Kräfte). Durch die Risse wird die schützende Passivschicht zerstört und es entsteht Spaltkorrosion, die häufig ohne sichtbaren Materialabtrag erfolgt. Die Verringerung des Flächenquerschnitts und die damit verbundene Erhöhung der Spannungen im Material, kann sehr schnell zu Bauteilversagen führen.

Die **kathodische Spannungsrissskorrosion** tritt an der Kathode auf, wenn dort Wasserstoffionen gebildet werden. Diese diffundieren in die Gitterstruktur des Metalls und rekombinieren dort zu Wasserstoff. Dadurch wird die Spannung im Gitter erhöht und die Rissbildung begünstigt.

Gekennzeichnet ist die Spannungsrissskorrosion durch einen trans<sup>5</sup>- oder interkristalliner<sup>6</sup> Rissverlauf senkrecht zur Hauptspannungsrichtung.

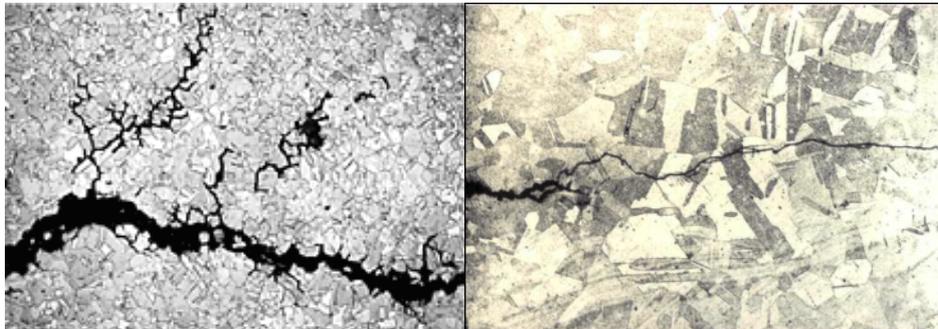


Abbildung 27 - Spannungsrissskorrosion (l.: interkristallin, r.: transkristallin) [12]

Besonders folgende Faktoren erhöhen das Risiko für Spannungsrissskorrosion:

- § Neigung des Werkstoffs zur Spaltkorrosion
- § Zugspannungen im Bereich von 50-100% der Streckgrenze (werkstoffspezifisch)
- § Vorhandensein von hohen Eigenspannungen, speziell in der Wärmeeinflusszone von Schweißnähten

<sup>5</sup> = Rissverlauf durch die Gefügekörner

<sup>6</sup> = Rissverlauf entlang der Korngrenzen

- § Hochfester Werkstoff mit Streckgrenzen von über  $700\text{N/mm}^2$  und einer Oberflächenhärte von größer 240 Vickershärten
- § Vorhandensein von  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{CO}$ , Phosphin, Arsin, Rhodanid und Thiosulfat im Elektrolyten

Aufgrund der hohen Passivität der Titan- und Titanlegierungen und der damit verbundenen Unempfindlichkeit gegenüber Spaltkorrosion ist die generelle Anfälligkeit gegen Spannungsrisskorrosion ebenfalls als äußerst gering zu bezeichnen [P4, S.122], [N2], [P9, S.23]. Lediglich bei Temperaturen über  $260^\circ\text{C}$  oder bei plastischer Dehnung ist Spannungsrisskorrosion möglich. Bei der Konstruktion von dauerhaft im Meer befindlichen Komponenten ist deshalb entweder auf eine geeignete Beschichtung oder geringe Oberflächenspannungen zu achten.

### II.III.XI Schwingungsrisskorrosion

Die Schwingungsrisskorrosion ist eine Sonderform der anodischen Spannungsrisskorrosion. Der Unterschied besteht darin, dass bei dieser Korrosionsart die Zugspannungen zyklisch auftreten. Die Anfälligkeit gegen Schwingungsrisskorrosion ist besonders bei niedrigen Frequenzen gegeben, da dann die Einwirkzeit des korrosiven Angriffs länger ist. Unter korrosiven Bedingungen erreicht die Wöhlerkurve deshalb keinen Dauerfestigkeitswert und fällt auch bei hohen Schwingspielen noch ab.

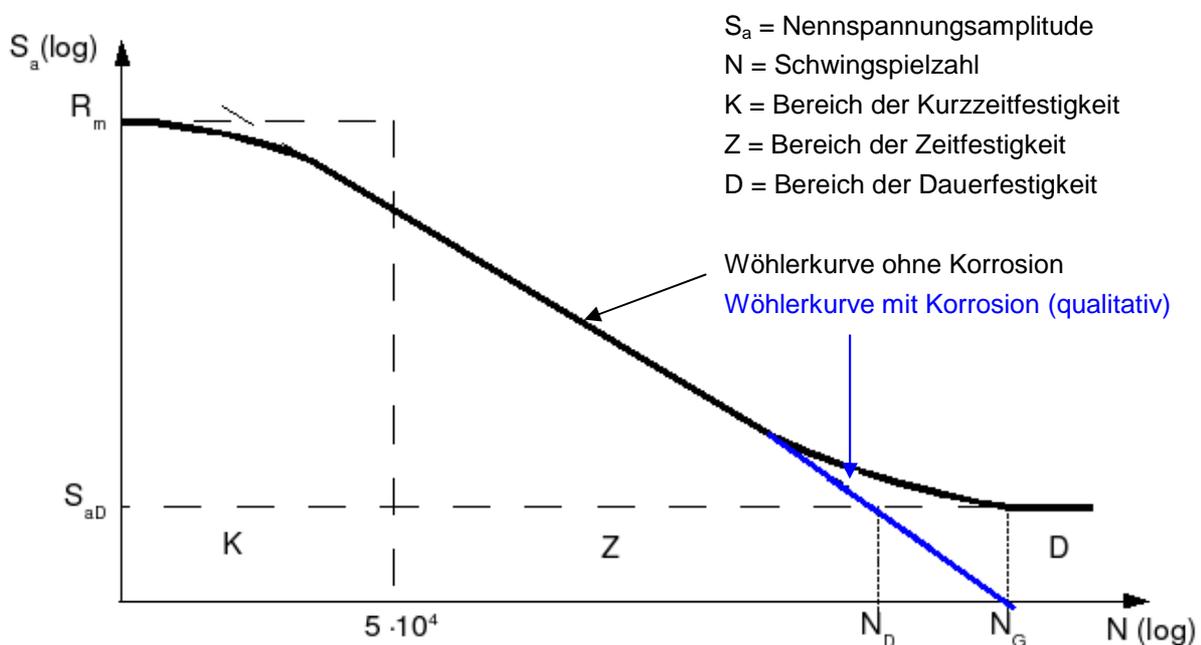


Abbildung 28 - Wöhler-Kurve [I3]

Reintitan und Titanlegierungen sind nicht anfällig gegen Schwingungsrisskorrosion im Meerwasser [N2].

### II.III.XII Erosionskorrosion, Reibkorrosion

Bei der Erosions- bzw. Reibkorrosion wird die elektrochemische Korrosion durch Materialabtrag der aufgebauten Schutzschichten bzw. Aufrauung der Oberfläche begünstigt. Die Ursache dafür sind Abtragungen infolge Wasseranströmung oder mechanischer Verschleiß an Funktionsflächen von Bauteilen.

Aufgrund der hohen Passivität von Reintitan und Titanlegierungen in Meerwasser werden Schadstellen sofort repassiviert. Dieses Verhalten ist weitgehend unabhängig von Strömungsgeschwindigkeit [N2] und Anteil der im Wasser befindlichen Abrasionspartikel (Bsp. Sand) [P4, S.122]. Für den Werkstoff TiAl6V4 beispielsweise wurden bei 27°C Wassertemperatur folgende Abtragungen gemessen:

Tabelle 8 - Abtragungsraten von TiAl6V4 [P4, S.122]

<b>Strömungsgeschwindigkeit in m/s</b>	0	15	46
<b>Abtragung in mm/a</b>	>0,003	0,048	0,038

Inwiefern jedoch veränderte Oberflächenabmessungen bzw. -rauigkeiten die Funktion beeinflussen ist anwendungsspezifisch zu klären.

### II.III.XIII Kavitationskorrosion

Durch Kavitation wie beispielsweise in Rohrleitungen oder am Schiffspropeller erfolgt ein Materialabtrag infolge der extremen lokalen Druckspitzen. Auch bei Titan ist diese Art der Korrosion möglich, da die Oxidschicht gegenüber den hohen Drücken nicht beständig ist. In der folgenden Vergleichstabelle sind verschiedene Werkstoffe aufgelistet:

Tabelle 9 - Kavitationskorrosion - Werkstoffvergleich [P23, S.503]

<b>Material</b>	<b>Kavitationskorrosionsrate *</b>
<b>TiAl6V4</b>	20 mm/Jahr
<b>AM355</b>	34 mm/Jahr
<b>Hastelloy C</b>	15 mm/Jahr
<b>Inconel 718</b>	13 mm/Jahr
<b>K Monel</b>	27 mm/Jahr

\* Werte für 22000Hz-Schwingung mit einer Amplitude von 0,025mm

Aus dieser Tabelle ist ersichtlich, dass der TiAl6V4 im Vergleich zu den anderen Werkstoffen eine gute Beständigkeit gegen Kavitationskorrosion besitzt. Dennoch sind Titanwerkstoffe in kritischen Anwendungen (Bsp. Schiffspropeller) auf diese Form der Korrosion noch zu testen.

## II.V Werkstoffvergleiche

### II.V.I Werkstofftabelle

In der folgenden Werkstofftabelle sind einige, in der in der Meerestechnik häufig verwendete Werkstoffe und ihre elektrochemischen Eigenschaften beim Einsatz im Meerwasser aufgeführt:

Tabelle 10 - Korrosionstabelle [N2], [P4], [P5], [P6]

Gruppe [N2]	Werkstoff (Kennziffer)	Wirksumme	freies Elektrodenpotential in Bezug zu Wasserstoffelektrode (praktische Spannungsreihe)	Beständigkeit gegen Loch- und Spaltkorrosion
<b>Stähle</b>				
<b>FE 1</b>	1.3914	40	+0,40V bis +0,70V	äußerst gering
	1.3974	40		
	1.4562	50		
	1.3964	36		sehr gering
	1.4462	31		
	1.4575	32		
	1.4401	23		
	1.4404	23		mäßig
	1.4436	25		
1.4571	24			
<b>FE 2</b>	1.4310	16	+0,20V bis +0,40V	groß
<b>FE 3</b>	1.4057	-	-0,50V bis +0,10V	groß
	1.4405	-		
<b>FE 4</b>	HY 80	-	-0,40V	groß
	unlegierte Stähle	-	-0,40V bis -0,35V	
<b>Kupferlegierungen</b>				
<b>CU 4</b>	2.0880	-	-0,03 bis +0,03V	sehr gering
	2.1972	-		
<b>CU 5</b>	2.0958	-	-0,04 bis +0,20V	gering
	2.0966	-	+0,04 bis + 0,20V	
	2.0967	-		
<b>Aluminiumlegierungen</b>				
<b>AL 2</b>	EN AW - 5754		-0,75 bis -0,40V	groß
	EN AW - 5083			
<b>AL 3</b>	EN AW - 6060			
<b>Nickellegierungen</b>				
<b>NI 1</b>	2.4360	-	-0,35 bis 0,00V	gering
<b>NI 2</b>	2.4819	64	0,00 bis +0,10V	äußerst gering
	2.4610	60		
<b>Titanlegierungen</b>				
<b>T1</b>	3.7025	-	+0,40V bis +0,55V	äußerst gering
	3.7035	-		
	3.7055	-		
	3.0765	-		
<b>sonstige Werkstoffe</b>				
-	Magnesium	-	-1,32V	groß
	Silber	-	+0,12...+0,16V	gering
	Zinn	-	-0,29V	groß
	Zink	-	-0,78V	groß

Bei der Auswertung dieser Tabellen erkennt man, dass Bereiche für das Elektrodenpotential angegeben werden. Dies resultiert aus den nicht genau definierbaren, inhomogenen Werkstoff- und Elektrolyteigenschaften. Bei der Kontaktkorrosionsanalyse sind somit die jeweils ungünstigen Werte zu verwenden. Dennoch befinden sich die Titanwerkstoffe deutlich im positiven Bereich und bilden demnach im metallischen Kontakt häufig die Kathode.

### **II.VI Korrosionsschutz**

Der Begriff „Korrosionsschutz“ beinhaltet alle Maßnahmen zur gezielten Veränderung eines Korrosionssystems, so dass Korrosionsschäden verringert werden [N1]. Für den Schutz von Titan oder dessen Kontaktpartnern sind die in der Meerestechnik üblichen aktiven und passiven Korrosionsschutzsysteme wie beispielsweise Materialzuschläge, Beschichtungen oder Opferanoden ebenfalls anwendbar.



Abbildung 29 - Opferanoden am Uboot [F1]

Welcher Schutz letztendlich angewendet wird, ist abhängig vom jeweiligen Einsatzzweck.

### **II.VII Fazit**

Aufgrund der ausgezeichneten Beständigkeit und der daraus resultierenden geringen Korrosionsanfälligkeit von Titan in den, in der Meerestechnik auftretenden Umweltbedingungen, ist Titan ein ideales Material für den Einsatz im Seewasserbereich und übertrifft dabei sogar die hochlegierten Edelstähle.

## III Verarbeitung von Titanwerkstoffen

In diesem Abschnitt werden bedingt durch den großen Umfang an Informationen lediglich einige, für die Meerestechnik wichtige, Verarbeitungsverfahren für Reintitan und Titanlegierungen vorgestellt. Detaillierte Informationen befinden sich in den angegebenen Quellen, vor allem [P1], [P9], [P10] und [P11].

### III.I Urformverfahren

Aufgrund der relativ hohen Rohstoffkosten sind die Urformverfahren produktspezifisch genau zu betrachten, um das Spanvolumen möglichst gering zu halten.

#### III.I.I Gießen

Wegen der hohen Rohstoffpreise und einem teilweise großen Bearbeitungsaufwand bei komplizierten Strukturen, sind Gießprodukte sehr interessant für die Produktherstellung. Generell sind dabei alle gebräuchlichen Titanwerkstoffe gießbar [P1, S. 275], wobei jedoch nur geringe Festigkeiten und Duktilitäten im Vergleich zu geschmiedeten Bauteilen erreicht werden [P1, S. 276]. Durch die steigende Reaktionsfreudigkeit der Titanwerkstoffe bei hohen Temperaturen, ist das Gießen nur unter Vakuum möglich, was wiederum zu erhöhten Prozesskosten führt. Eine ausführliche Prozessbeschreibung ist in [P1, S.261ff.] und [P1, S.275ff.] zu finden. Speziell bei den Produkten in der Meerestechnik und der damit verbundenen, meistens sehr geringen Stückzahl, ist der Einsatz von Gießverfahren zur Produktherstellung sorgfältig zu prüfen.

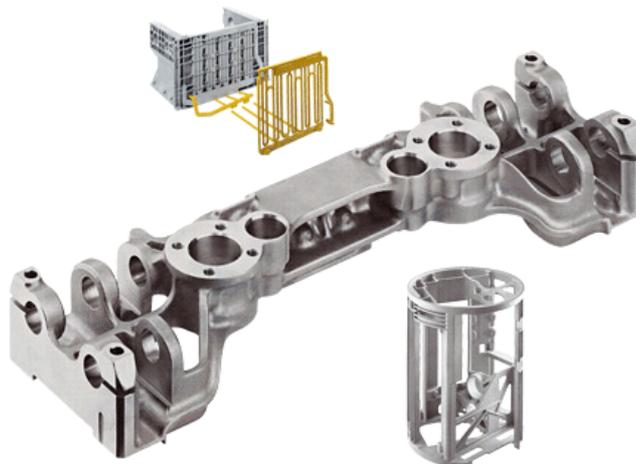


Abbildung 30 - Feigussteile [www.tital.de, 15.06.2010]

Bei der Gestaltung von Gussteilen ist jedoch darauf zu achten, dass zum derzeitigen Stand der Technik die Baugröße und das Gewicht von Titangussteilen durch die Vakuumofengröße und die einzuschmelzende Materialmenge beschränkt sind. Die

Konstruktion von großen Gussteilen ist deshalb unbedingt in Abstimmung mit dem GussHersteller durchzuführen.

### III.I.II Pulvermetallurgie

Die Pulvermetallurgie ermöglicht die Herstellung komplizierter Bauteilstrukturen bei gleichzeitiger Vermeidung von hohem Spanvolumen. Die Produktherstellung erfolgt dabei durch Kompaktierung des Pulvers durch heißisostatisches Pressen bei 2000bar und 920°C. Dabei werden Materialeigenschaften erreicht, die annähernd denen von Schmiedeteilen entsprechen und somit deutlich über den Gusswerkstoffen liegen. Auch bei diesem Herstellungsverfahren sind aufgrund der geringen Stückzahl die Prozesskosten sorgfältig zu prüfen.

### III.I.III Rapid Prototyping

Das Rapid Prototyping ist eine effektive Möglichkeit zur Herstellung von kleinen Bauteilen als Einzelanfertigung bzw. Kleinserie. Ein Beispiel dafür ist das Laserstrahlgenerieren, wie es bereits erfolgreich im Flugzeugbau und in der Medizintechnik anstelle eines Feingießverfahrens oder spanintensiver Bearbeitung angewendet wird.

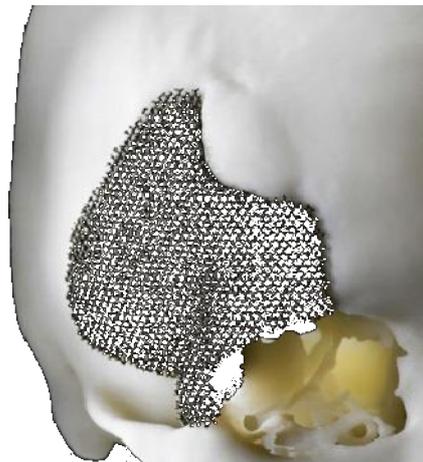


Abbildung 31 - Rapid-Prototyping [www.gizmag.com, 15.06.2010]

#### *Vorteile:*

- § sehr feine Strukturen herstellbar
- § beliebige Formgebung mit Hinterschneidungen und Hohlräumen
- § gute Festigkeitseigenschaften
- § mannlose Fertigung über Nacht / Wochenende

#### *Nachteile:*

- § lange Prozesszeiten (ca. 2-20cm<sup>3</sup>/h)
- § beschränkte Bauteilgröße
- § Nachbearbeitung von Funktionsflächen notwendig

## **III.II Umformverfahren**

### **III.II.I Kaltumformung**

Die Umformverfahren von Titanwerkstoffen unterscheiden sich bis auf die Maschinenparameter kaum von denen für die Stahlverarbeitung. Grundsätzlich sind jedoch  $\beta$ -Legierungen aufgrund ihrer Gitterstruktur besser für kaltumformende Fertigungsverfahren geeignet als  $\alpha$ -Reintitanwerkstoffe (siehe auch Anhang „I.IX Umformbarkeit“).

### **III.II.II Warmumformung**

Die Warmumformungsprozesse werden häufig zur Verarbeitung von hochfesten Titanlegierungen mit geringen Bruchdehnungen eingesetzt. Dabei sind jedoch wiederum die Umformtemperatur und die damit verbundene Reaktionsfreudigkeit von Titanoberflächen zu beachten. Das Umformen unter Vakuum oder Schutzgasatmosphäre oder eine anschließende Beseitigung der Oxidationsschicht mittels Strahlen und Beizen sind deshalb unabdingbar.

### **III.II.III Schmieden**

Das Schmieden ist das am häufigsten verwendete Umformverfahren für Reintitan und Titanlegierungen, wodurch bereits eine hohe Prozesssicherheit und Reproduzierbarkeit der Werkstoffeigenschaften gewährleistet werden kann.



Abbildung 32 - kompliziertes Schmiedeteil: Lukendeckel

Auch bei diesem Verfahren ist die Oberflächenversprödung infolge der Warmumformung zu beachten und mittels Bearbeitungszugaben zu kompensieren.

### **III.II.IV Superplastisches Verformen**

Reintitan und Titanlegierungen besitzen die Eigenschaft, sich bei hohen Temperaturen und geringen Umformgeschwindigkeiten extrem plastisch verformen zu lassen. Das superplastische Umformen ist deshalb wie bei Kunststoffen auch für Titanwerk-

stoffe möglich, wobei plastische Verformungsgrade von bis zu 1000% erreicht werden können [P1, S.269].

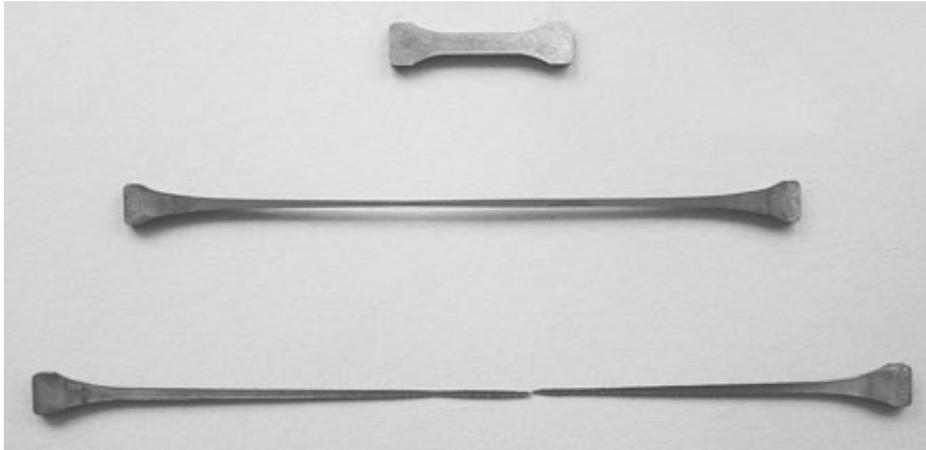


Abbildung 33 - Superplastisches Verformen [www.mpg.de, 15.06.2010]

Dieses Verfahren wird überwiegend zur Herstellung dünnwandiger Bleche, beispielsweise in der Automobiltechnik, eingesetzt.

### **III.III Trennverfahren**

#### **III.III.I Sägen**

Das Sägen von Reintitan oder Titanlegierungen erfolgt mit Schnittgeschwindigkeiten, die ca. 25% unter denen von Stahl liegen [P16, S.1]. Aufgrund des hohen Werkzeugverschleißes durch die Oxidschichten, wird empfohlen, diese vorher mittels Beizen, Schleifen oder Abstrahlen zu entfernen.

#### **III.III.II Brennschneiden**

Titan lässt sich mit den üblichen Plasma- und Brennschneidverfahren trennen. Jedoch ist dabei zu beachten, dass ein Aufmaß von mindestens 6 Millimeter [P11, S.20] einzuhalten ist um das versprödete Material in der Wärmeeinflusszone des Trennvorgangs abarbeiten zu können.

#### **III.III.III Wasserstrahlschneiden**

Das Wasserstrahlschneiden ist ein übliches Verfahren für den Zuschnitt von Titanhalbzeugen, wobei aufgrund der geringen Verarbeitungstemperaturen keine Gefügeänderungen in der Schnittzone auftreten. Somit ist weder eine Schutzgasatmosphäre, noch Vakuum notwendig. Dennoch sind Aufmaße für zu bearbeitende Funktionsflächen zu beachten.

### **III.IV Spanende Verfahren**

#### **III.IV.I Allgemeine Richtlinien**

Titanwerkstoffe stellen im Gegensatz zu den üblichen Stählen besondere Anforderungen an die spanabhebenden Bearbeitungsverfahren. Die Gründe dafür sind die mechanischen und physikalischen Materialeigenschaften, welche folgende Auswirkungen auf die Zerspanbarkeit haben:

- § geringe Wärmeleitfähigkeit → geringe Wärmeabfuhr durch die Späne → hohe Temperaturen an der Werkzeugschneide → hoher Werkzeugverschleiß
- § geringe Wärmeleitfähigkeit + niedriger E-Modul → Späne neigen zum Verschweißen mit der Werkzeugschneide
- § hohe Festigkeit → hoher Verschleiß an der Werkzeugschneide
- § diskontinuierliche Spanbildung → periodische Wechselbelastung der Werkzeugschneide → hoher Verschleiß
- § geringer E-Modul → stärkere Durchbiegung der Drehteile bei der Bearbeitung

Aufgrund dieser Probleme bei der Zerspannung von Reintitan und Titanlegierungen sind folgende Maßnahmen notwendig:

- § hohe Steifigkeit der Bearbeitungsmaschine
- § kurze, schwingungsfreie Werkstückeinspannung
- § scharfe Schneiden mit großem Freiwinkel
- § geringe Vorschubgeschwindigkeit (ca. 33% von Stahl)
- § möglichst hohe Schnitttiefe
- § reichliche Kühlung

Die Richtwerte für die Maschinenparameter sind in [N8], [P15, S.73] und [P16, S.1] zu finden.

#### **III.IV.II Fräsen / Drehen**

Titan neigt bei der spanenden Bearbeitung zum Verschweißen mit dem Werkzeug. Somit ist das Fräsen generell schwieriger als das Drehen. Grundsätzlich ist beim Fräsen das Gleichlaufräsen zu bevorzugen, um den Werkstoffverschleiß zu minimieren.

#### **III.IV.III Bohren**

Beim Bohren von Titanwerkstoffen ist generell auf eine feste Einspannung des Werkstücks zu achten. Somit sollte das Bohren von Hand weitestgehend vermieden werden. Generell sind dabei hochkobalthaltige Schnellarbeitsstähle mit kurzer Schneidlänge, spitzer Schneide und verstärktem Kern als Werkzeug zu wählen und bei der Bearbeitung auf ausreichend Kühlung durch chloriertes Schneidöl zu achten.

Beim Bohren selbst ist das Werkzeug kräftig aufzusetzen und Späne durch mehrmaliges Abheben aus der Bohrung zu entfernen.

#### **III.IV.IV Gewindeschneiden**

Wegen der Neigung von Titanwerkstoffen zum Fressen ist beim Gewindeschneiden auf die Anwendung chemisch aktiver Schmiermittel (schwefelhaltige Schneidöle mit Graphitzusätzen) zu achten. Innengewinde sind möglichst nicht von Hand zu schneiden. Außengewinde sind durch Drehen herzustellen, wobei die Gewindetiefe langsam zu vergrößern ist.

Aufgrund dieser Schwierigkeiten bei der Herstellung von Gewinden sind demnach bei der Konstruktion mittelbare Schraubenverbindungen zu bevorzugen.

#### **III.IV.V Schleifen**

Besonders beim Schleifen ist die geringe Wärmeabfuhr durch die niedrigen Wärmeleitungskoeffizienten der Titanwerkstoffe ein Problem. Als Folge davon sind chemische Reaktionen zwischen Schleifmedium und Werkstück möglich, die zum Verschmieren oder Verbrennen der Oberflächen führen können. Auf die Einhaltung geringer Schleifgeschwindigkeiten und Zuführung großer Kühlmittelmengen ist deshalb unbedingt zu achten. Als Schleifmedium sind Aluminiumoxidscheiben, Siliziumkarbidscheiben mit keramischer Bindung und Diamantscheiben mit Harzbindung zu bevorzugen.

#### **III.IV.VI Gefahren bei der spanenden Bearbeitung**

**Bei der Bearbeitung ist auf die Vermeidung von hohen Titanstaubkonzentrationen in Kombination mit hohen Temperaturen zu achten, da diese wegen der hohen Reaktionsfreudigkeit von Titan zu Verpuffungen führen oder entzündet werden können. Die spanende Bearbeitung hat aus diesem Grund stets mit einer ausreichenden Kühlung zu erfolgen.**

#### ***III.V Erodieren von Titan***

Die Erodierverfahren Draht- und Senkerosion werden zur Herstellung von komplizierten Geometrien verwendet, die mittels herkömmlicher Spanverfahren nicht hergestellt werden können (Bsp. Rechtecktasche in Werkstück). Für Titanwerkstoffe sind diese Verfahren ebenfalls anwendbar und in der Industrie bereits weitläufig verfügbar, da die gleichen Maschinen und Elektroden wie für die Stahlbearbeitung verwendet werden können.



Abbildung 34 - Erodieren von Titan [www.alltec-precision.com, 15.06.2010]

Beim Erodieren von Titan sind sowohl die Oberflächenversprödung infolge der Erwärmung durch die Bearbeitung als auch die mikrostrukturelle Verschmutzung durch Partikel der Elektrode zu berücksichtigen. Die Versprödung ist durch eine bläulich schimmernde Oberfläche zu erkennen, die jedoch aufgrund der geringen Expositionszeit nur relativ dünn (ca. 70nm) ist und somit nur geringen Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften des Bauteils besitzt.

#### **III.VI Oberflächenbehandlung**

Wie auch bei Stahl und Aluminium existiert für Titanwerkstoffe eine Vielzahl von Beschichtungsmöglichkeiten von Farb- über Kunststoff bis hin zu Metallspritzverfahren. Aus diesem Grund werden im folgenden Abschnitt nur einige wichtige Verfahren vorgestellt. Für die anwendungsbezogene Auswahl einer geeigneten Legierung ist jedoch in jedem Fall der entsprechende Beschichtungshersteller zu befragen.

##### **III.VI.I Nitrieren**

Das Nitrieren wird bei Titanwerkstoffen bereits seit vielen Jahren als gängiges Verfahren zur Erhöhung der Verschleißfestigkeit eingesetzt. So existieren beispielsweise Erfahrungen in der Beschichtung von Bauteilen mit einer Länge von bis zu 4m bzw. einem Durchmesser von bis zu 750mm [P10, S.11], wobei Oberflächenhärten von bis zu 2500HV erreicht wurden. Die Werkstücke werden dazu im Vakuumofen bei einer Temperatur von 770-870°C ca. 16h lang einer hochreinen Stickstoffatmosphäre ausgesetzt. Durch das Nitrieren von Titanwerkstoffen ist es möglich, die Verschleißfestigkeit deutlich zu erhöhen und diese Materialien auch in Führungen oder Lagern einzusetzen.

##### **III.VI.II Kunststoffbeschichtungen**

Besonders Kunststoffbeschichtungen eignen sich wegen der hohen Korrosionsbeständigkeit, der geringen Reibwerte und der ausgezeichneten elektrischen Isolation besonders gut für gleitende Anwendungen. Durch das Aufbringen einer derartigen Beschichtung ist es möglich, Titan auch für Komponenten mit gleitenden Oberflächen

einzusetzen. Für einen Langzeitbetrieb sind Kunststoffoberflächen aufgrund des Verschleißes jedoch nur bedingt geeignet. Die entsprechende Lebensdauer ist mit dem jeweiligen Hersteller abzusprechen.

#### **III.VI.III Galvanische Beschichtung**

Die sich auf der Oberfläche ausbildende Oxidschicht ist ein Hindernis für die galvanische Beschichtung von Reintitan und Titanlegierungen. Diese sind somit vorher durch entsprechende Reinigungsverfahren zu entfernen [P10, S.13].

Die Auswahl eines entsprechenden Beschichtungssystems und die damit verbundenen Oberflächenvorbehandlung ist anwendungsspezifisch mit dem jeweiligen Hersteller abzusprechen. Dabei ist jedoch auf die Korrosionsbeständigkeit in Seewasserumgebung zu achten.

#### **III.VI.IV Flamm-/ Plasmaspritzbeschichtung**

Spritzbeschichtungen besitzen wegen der hohen Härte, der ausgezeichneten Korrosionsbeständigkeit und des geringen Reibwerts ein enormes Potential in der Beschichtungstechnik. Für Titanwerkstoffe sind diese Verfahren ebenfalls nach gründlicher Reinigung der Oberfläche und gegebenenfalls Entfernen der Oxidschicht anwendbar. Als Beispiel dafür dient die PlasmaCoat-Beschichtung der Firma Impreglon AG.

#### **III.VI.V Farbbeschichtung**

Eine Farbbeschichtung ist aufgrund der ausgezeichneten Korrosionsbeständigkeit von Reintitan und Titanlegierungen normalerweise nicht notwendig. Insofern sich jedoch Titanwerkstoffe in direktem Kontakt mit sonstigen Metallen befinden, ist eine Oberflächenbeschichtung der Titanwerkstoffe zur Verringerung der Kathodenfläche und der damit verbundenen Reduzierung der Korrosionsgeschwindigkeit der Kontaktpartner zu empfehlen.

Die notwendigen Oberflächenvorbehandlungen (Säuberung, Entfernen der Oxidschicht, etc.) sind in Absprache mit dem Hersteller des Beschichtungssystems individuell festzulegen [P10].

#### **III.VI.VI Einfärbung / Beschriftung mittels Laser Colouring**

Wenn Titanlegierungen hohen Temperaturen in einer atmosphärischen Umgebung ausgesetzt werden, bilden diese Anlauffarben aus (siehe auch Schmelzschweißverfahren). Die jeweilige Farbe wird durch die Dicke der Oxidschicht und der damit verbundenen Reflexionseigenschaft erzeugt. Diese Eigenschaft wird beim Laser Colouring ausgenutzt, indem der Laser die Metalloberfläche erwärmt.



Abbildung 35 - Laser Colouring [www.industrial-lasers.com, 15.06.2010]

Besonders interessant ist dieses Verfahren zur effektiven Herstellung von Typenschildern aus Titan, die sich durch eine hohe Korrosionsbeständigkeit auszeichnen.

### III.VI.VII Einfärbung durch anodische Oxidation

Bei der anodischen Oxidation wird die Farbe durch die Dicke der Oxidationsschicht und somit mittels Beeinflussung der Lichtreflexion gemäß der folgenden Abbildung eingestellt:

#### FÄRBUNG DURCH ANODISCHE OXIDATION

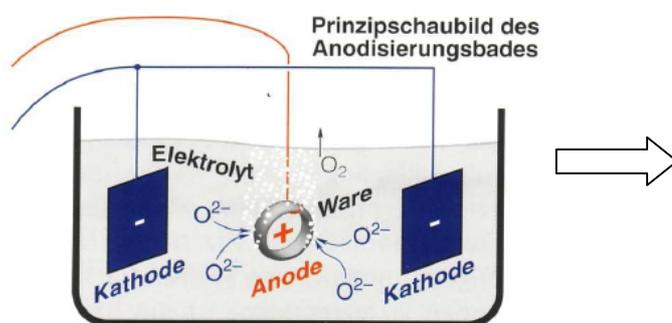


Abbildung 36 - li: anodische Oxidation, re: Fixierelemente [P35, S.9]

Je höher dabei die angelegte Spannung ist, desto mehr Sauerstoff wird an der Anode angelagert und dadurch die Dicke der Oxidationsschicht eingestellt.

### III.VII Fazit

Die üblichen Verarbeitungsverfahren für Stahl sind mittels Anpassung ebenfalls für Titanwerkstoffe anwendbar. Dies erlaubt einen vielfältigen Einsatz von Titan in Neukonstruktionen und eine einfache Substitution von Stahl in gewichts-, festigkeits- und korrosionsproblematischen Komponenten.

## **IV Fügen von Titanbaukomponenten**

### ***IV.I Schraubenverbindungen***

#### **IV.I.I Problem: Fressen von Titanwerkstoffen**

Wie bei den chemischen und physikalischen Materialeigenschaften erwähnt, besitzen Titanwerkstoffe aufgrund ihrer Oxidschicht eine starke Neigung zum Fressen bei gleitendem Kontakt. Um dies bei Schraubenverbindungen zu verhindern gibt es zwei Möglichkeiten:

1. Für ungesicherte Schraubenverbindungen sind Anti-Fress-Pasten beim Einschrauben zu verwenden.
2. Für zu sichernde Verbindungen sind Schraubensicherungen zu verwenden, die beim Einschrauben das Fressen der Gewindewerkstoffe verhindern.

#### **IV.I.II Mittelbare Schraubenverbindung**

Bei mittelbaren Schraubenverbindungen werden die Werkstücke durch eine Durchgangsschraube mit aufgeschraubter Mutter verbunden. Für die Verbindung von Titankomponenten stehen dabei zwei Möglichkeiten zur Verfügung:

1. Als Schrauben- und Mutterwerkstoff wird ebenfalls Titan verwendet. Dadurch wird sichergestellt, dass sowohl die chemischen als auch die physikalischen Eigenschaften denen des Grundmaterials entsprechen (Bsp. Wärmeausdehnungskoeffizient, Elektrodenpotential). Dabei sind allerdings die entsprechenden Maßnahmen gegen das Fressen im Gewinde zu beachten.
2. Als Schrauben- und Mutterwerkstoff wird der spalt- und kontaktkorrosionsbeständige Stahl 1.4436K-80 [DIN 17440] verwendet. Deshalb sind lediglich die üblichen Fügevorschriften für Schraubenverbindungen anzuwenden. Allerdings sind dabei die unterschiedlichen Materialeigenschaften zwischen Stahl und Titan zu berücksichtigen (Bsp. Wärmeausdehnungskoeffizient).

#### **IV.I.III Unmittelbare Schraubenverbindung**

Bei der konstruktiven Integration von unmittelbaren Schraubenverbindungen sind die folgenden Punkte zu berücksichtigen:

1. Die Anfertigung von Innengewinden bei Titanwerkstoffen ist im Vergleich zu Stählen aufgrund der starken Neigung zum Fressen des Gewindeschneidwerkzeugs relativ aufwendig. Generell sollten Innengewinde deshalb weitestgehend vermieden werden.
2. Insofern diese Verbindungsart erforderlich ist, sind die entsprechenden Maßnahmen zur Vermeidung von Fressen vorzusehen.

3. Bei der Verwendung der Werkstoffkombination von Titan mit dem rostfreien Stahl 1.4436K-80 [DIN17440] sind die gleichen Maßnahmen gegen das Fressen wie bei Titan-Titan-Verbindungen vorzusehen.

### **IV.I.IV Fazit**

Wenn möglich sind mittelbare Schraubenverbindungen zu bevorzugen, da dort sowohl die Anfertigung von Durchgangslöchern in Titan als auch die Verwendung von Stahl als Schrauben- und Mutternwerkstoff für die meisten Anwendungen als unproblematisch zu bezeichnen ist.

### **IV.II Stiftverbindungen**

Stiftverbindungen an Titanbauteilen stellen im Allgemeinen keine besonderen Probleme dar. Beim Einsetzen der Stifte ist jedoch auf die Verwendung von Anti-Fress-Pasten (Bsp. Loctite 8023) zu achten, um ein problemloses Lösen der Stiftverbindung gewährleisten zu können.

### **IV.III Schmelzschweißverbindungen**

Aufgrund der Vielseitigkeit dieses Themas sind in diesem Abschnitt lediglich einige, für die Meerestechnik relevante, Punkte für das Schweißen von Reintitan und Titanlegierungen angeführt. Eine komplette Ausarbeitung ist in [P11] bzw. [P14] zu finden.



Abbildung 37 - TIG - Schweißen von Ti2 [P13, S.6]

#### **IV.III.I Schweißbarkeit**

Im Allgemeinen sind Reintitan und Titanlegierungen sehr gut schweißbar, zumal die Anfälligkeit dieser Werkstoffe gegen Schweißspannungen und Rissbildung deutlich geringer ist, als bei den in der Meerestechnik verwendeten Stahlsorten [P11]. Dies resultiert sowohl aus dem niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizient als auch aus

dem deutlich geringeren Elastizitätsmodul gegenüber Stahl. In der folgenden Tabelle ist die Schweißbarkeit für verschiedene Werkstoffe aufgelistet:

Tabelle 11 - Schweißbarkeit von Titanwerkstoffen [P11, S.4]

Werkstoff	ASTM - Grad	Schweißbarkeit
Reintitan	1 - 4	hervorragend
niedrig legierte Titanlegierungen	7, 11 - 17, 26, 27	hervorragend
TiAl3V2,5	9, 18, 28	hervorragend
TiAl6V4	5, 23, 24, 29	mittel - gut
TiAl5Sn2,5	6	gut - hervorragend

Eine Schweißverbindung zwischen Titanwerkstoffen und Stählen ist wegen der schlechten Löslichkeit von Eisen in Titan sehr schwierig (Ausnahme: Sprengplattieren, Reibschweißen). Dabei werden intermetallische TiFe-Phasen gebildet, die aufgrund ihrer hohen Sprödigkeit nicht verwendbar sind. Es muss somit ein Zwischenwerkstoff in Form von Folien eingesetzt werden, der sowohl mit Titan als auch mit Stahl verschweißt werden kann, ohne dass eine hohe Versprödung auftritt. Ein solcher Werkstoff ist **Vanadium** [P14, S.4].

Für Kupfer-Titan-Schweißverbindungen wird Niob und für Aluminium-Titan-Verbindungen Silber eingesetzt.

**Bei der Wahl des Zwischenwerkstoffs ist jedoch beim Einsatz in der Meerestechnik unbedingt auf die Anfälligkeit gegen Kontaktkorrosion zu achten!**

#### IV.III.II Schweißnahtvorbereitung

Vor dem Schweißen sind die notwendigen Schweißnahtvorbereitungen nach [P11] bzw. [P14] durchzuführen. Die Kantengeometrie ist dabei vom jeweiligen Schweißverfahren und der Materialstärke abhängig, so dass an dieser Stelle keine generellen Aussagen getroffen werden können. Inwiefern ein Vorwärmen bei sensiblen Komponenten (Bsp. Druckkörperbestandteile) notwendig ist, ist in Praxisversuchen zu ermitteln.

Generell ist bei der Schweißnahtvorbereitung auf eine gründliches Entgraten und Reinigen des Schweißbereiches zu achten [P14]. Bewährt haben sich dafür wässrige Lösungen aus Salpetersäure und Flusssäure mit anschließender Reinigung durch Azeton. Die Verwendung von chlorionenhaltigen Lösungsmitteln sollte jedoch vermieden werden, da dieses zu Spannungsrisskorrosion führen kann.

#### IV.III.III Schutzgasatmosphäre

Reintitan und Titanlegierungen weisen bei hohen Temperaturen ab ca. 300°C eine deutlich gesteigerte Affinität zu den Gasen Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff auf. Die Folge davon ist eine Gasaufnahme beim Schweißen ohne Schutzgasatmosphäre

re, was zu einer starken Versprödung des Werkstoffes führt. Somit sind sämtliche autogene Schweißverfahren für Reintitan und Titanlegierungen **NICHT** möglich.

**Bei jedem Schweißvorgang ist deshalb unbedingt darauf zu achten, dass sowohl während als auch nach dem Schweißprozess der komplette Wärmeeinflussbereich (Schweißnaht, Wärmeeinflusszone, Wurzelseite) des Werkstücks mit Temperaturen > 300°C [N8] durch ein Inertgas geschützt werden. In der Regel wird dabei Argon mit einer Reinheit von >4,8 (99,9998%) und einem Taupunkt < -50°C eingesetzt [P11].**

Für die Abschirmung der Wärmeeinflusszone werden je nach Anwendungsgebiet entweder Schutzgaskammern, Schutzgasglocken oder Schienen verwendet, die direkt am Bauteil befestigt werden.



Abbildung 38 - Schutzgasschiene [P11, S.19]

Eine andere Möglichkeit zum Schutz der Schweißnaht vor Gaskontamination ist das Schweißen unter Vakuum, was jedoch nur für kleine Komponenten möglich ist.

#### IV.III.IV Wolfram-Inertgas-Verfahren (WIG)

Das Wolfram-Inertgas- (WIG) bzw. das Tungsten-Inertgas-Verfahren (TIG) sind die am weitest verbreiteten Schweißverfahren für Reintitan und Titanlegierungen und unterscheiden sich lediglich im Elektrodenwerkstoff (Wolfram bzw. Tungsten Alloy<sup>7</sup>) voneinander. Dabei wird das Material durch einen Lichtbogen zwischen der Elektrode und den zu verbindenden Bauteilen aufgeschmolzen, während die Schweißzone mittels eines Inertgases von der Atmosphäre abgeschirmt wird [P11, S.5].

#### *Festigkeiten:*

Tabelle 12 - Festigkeiten im Schweißnahtbereich (TIG) [P11, S.5]

Werkstoff	Dehngrenze		Zugfestigkeit		Bruchdehnung	
	BM <sup>8</sup>	SN	BM	SN	BM	SN
Ti2	325	380	460	510	26	18
TiAl6V4	900	880	1000	1020	14	8
TiAl3V2,5	670	625	705	745	15	12

<sup>7</sup> Tungsten-Legierung (Europa-Patent EP1409195)

<sup>8</sup> BM = Basismaterial, SN = Schweißnaht

*Vorteile:*

- § Hand- oder Maschinenschweißen möglich
- § alle Schweißpositionen möglich
- § hohe Schweißnahtqualität
- § ausgeprägte industrielle Erfahrungen
- § keine Schweißspritzer
- § geringe Kosten

*Nachteile:*

- § sehr geringe Produktivität
- § beschränkte Eindringtiefe
- § relativ hohe Wärmeeinbringung → großer Verzug
- § Werkstoffeinschlüsse in der Schweißnaht bei Kontakt zwischen Elektrode und Schweißzone

#### **IV.III.V Metall-Inertgas-Verfahren (MIG)**

Bei diesem Schweißverfahren wird ein Lichtbogen zwischen dem Werkstück und der stetig nachgeführten Titanelektrode gebildet. Zur Reduzierung von Schweißspritzern wird mit gepulstem Gleichstrom (Elektrode positiv) in Kombination mit einem Argon-Helium-Schutzgas geschweißt.

In der Vergangenheit wurde dieses Verfahren aufgrund des hohen Strombedarfs und der vorhandenen schlechten Oberfläche von Titandrähten und des damit verbundenen hohen Düsenverschleißes relativ selten angewendet. Diese Probleme wurden durch die Weiterentwicklung der gepulsten Stromkonverter und Schweißdrahtqualitäten abgestellt und somit ein Einsatz in der Herstellung von meerestechnischen Konstruktionen ermöglicht [P11, S.6].

*Festigkeiten:*

Tabelle 13 - Festigkeiten im Schweißnahtbereich (MIG) [P11, S.6]

Werkstoff	Dehngrenze		Zugfestigkeit		Bruchdehnung	
	BM <sup>9</sup>	SN	BM	SN	BM	SN
TiAl6V4	934	848	987	979	17	8

*Vorteile:*

- § Hand- oder Maschinenschweißen möglich
- § alle Schweißpositionen möglich
- § höhere Produktivität als beim TIG-Verfahren

---

<sup>9</sup> BM = Basismaterial, SN = Schweißnaht

*Nachteile:*

- § Schweißspritzer
- § geringere Schweißnahtqualität

#### **IV.III.VI Laserstrahlschweißen**

Beim Laserstrahlschweißverfahren wird die Schweißzone unter Schutzgasatmosphäre durch einen Laserstrahl aufgeschmolzen, es erfolgt kein Einbringen von Schweißzusatzwerkstoffen.

*Vorteile:*

- § automatisierter Prozess
- § hohe Schweißgeschwindigkeit (bis 30x höher als beim WIG-Verfahren [P20,S.12])
- § hohe Materialstärken mit einer Lage schweißbar (Bsp. 20mm Blech mit 25kW CO<sub>2</sub>-Laser)
- § schmale, gleichmäßige Schweißnaht
- § kleine Wärmeeinflusszone → geringer Verzug + geringe Gasaufnahme
- § komplexe Geometrien durch Verwendung von Umlenkoptiken oder Faserlaseranlagen schweißbar
- § Kombination mit anderen Schweißverfahren möglich (Bsp. Laser-MSG-Hybridschweißen) → optimale Anpassung des Schweißverfahrens an Werkstoff möglich
- § schnelle Strahlablenkung (nicht bei Faserlaser) → „Rühren“ des aufgeschmolzenen Werkstoffs möglich

*Nachteile:*

- § hohe Anforderungen an Geometrietoleranzen der Nahtvorbereitungen
- § eingeschränkter Einsatz durch automatisierten Prozess → kein beliebiger Einsatzort
- § hohe Investitionssumme (wird durch hohe Produktivität relativiert)
- § Schweißspritzer je nach Verfahren möglich

#### **IV.III.VII Elektronenstrahlschweißen**

Das Elektronenstrahlschweißen erfolgt in einer Vakuumkammer, wobei das Werkstück unter einer fixen Elektronenstrahlkanone verfahren wird. Der Elektronenstrahl verdampft den Werkstoff dabei schlagartig. Durch die entstehende Dampfkapillare kann dieser sehr tief in das Werkstück eindringen, was ein einlagiges Schweißen von Materialstärken bis zu 80mm ermöglicht. Anschließend fließt das aufgeschmolzene Material aus der Umgebung in den Spalt und verschweißt die Werkstücke.

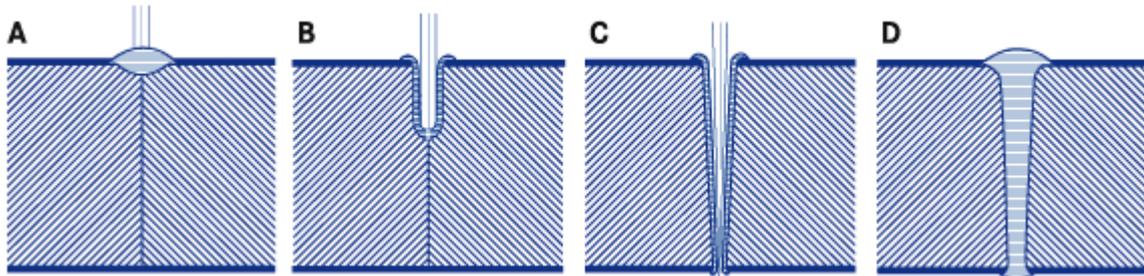


Abbildung 39 - Elektronenstrahlschweißen [www.ptr-gmbh.de, 15.06.2010]

*Vorteile:*

- § automatisierter Prozess
- § extrem hohe Schweißgeschwindigkeit
- § große Materialstärken mit einer Lage schweißbar (Bsp. 80mm Blech)
- § schmale, gleichmäßige Schweißnaht
- § kleinste Wärmeeinflusszone → geringer Verzug + geringe Gasaufnahme
- § keine Gasaufnahme möglich, da Schweißen im Vakuum
- § extrem schnelle Strahlablenkung → „Rühren“ des aufgeschmolzenen Werkstoffs möglich

*Nachteile:*

- § hohe Anforderungen an Geometrietoleranzen der Nahtvorbereitungen
- § eingeschränkter Einsatz durch automatisierten Prozess → kein beliebiger Einsatzort
- § Vakuumkammer notwendig → deutliche Einschränkung der Flexibilität
- § hohe Investitionssumme (wird durch hohe Produktivität relativiert)
- § Schweißspritzer je nach Verfahren möglich

### IV.III.VIII Beurteilung der Schweißnahtqualität

Die Qualität von Titanschweißverbindungen hängt im Wesentlichen von der Gasaufnahme und der daraus resultierenden Versprödung ab. Deshalb sind Verfahren, die eine kleine Wärmeeinflusszone und somit hohe Abkühlgeschwindigkeiten erzeugen im Vorteil. In der folgenden Abbildung sind die Wärmeeinflusszonen der verschiedenen Schweißverfahren dargestellt:

#### IV Fügen von Titankomponenten

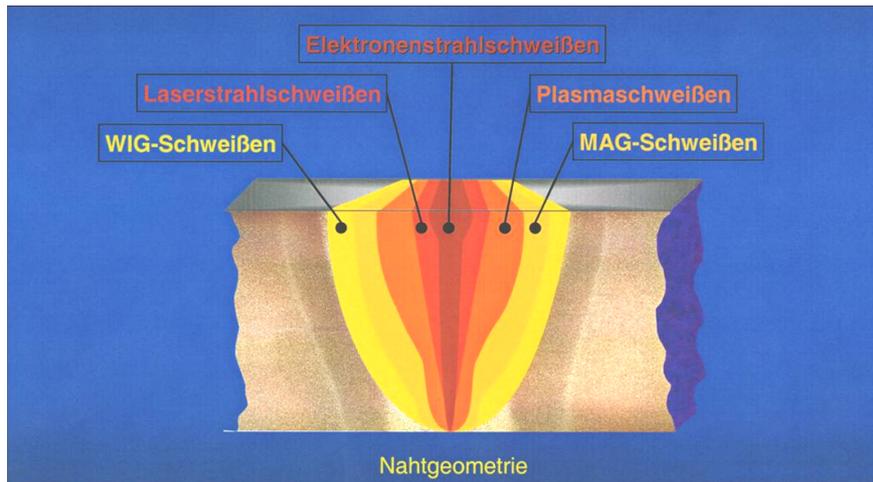


Abbildung 40 - Vergleich der Wärmeeinflusszonen [P21, S. 11]

Eine effektive Möglichkeit für die schnelle Beurteilung der Schweißnahtqualität ist die Sichtkontrolle, wobei der Grad der Kontamination anhand der folgenden Anlauffarben festgestellt werden kann:

- § silbern: sehr gute Abschirmung gegen Kontamination
- § strohfarben: geringe Kontamination → akzeptabel
- § dunkelblau: mittlere Kontamination → eventuell noch akzeptabel
- § hellblau: schwere Kontamination → nicht akzeptabel
- § grau-blau: sehr schwere Kontamination → nicht akzeptabel
- § grau: sehr schwere Kontamination → nicht akzeptabel
- § weiß: sehr schwere Kontamination → nicht akzeptabel

In der folgenden Abbildung sind Beispiele für Schweißnahtkontaminationen mit atmosphärischen Gasen (Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff) dargestellt, wobei die Höhe der Kontamination von 1 bis 8 zunimmt:

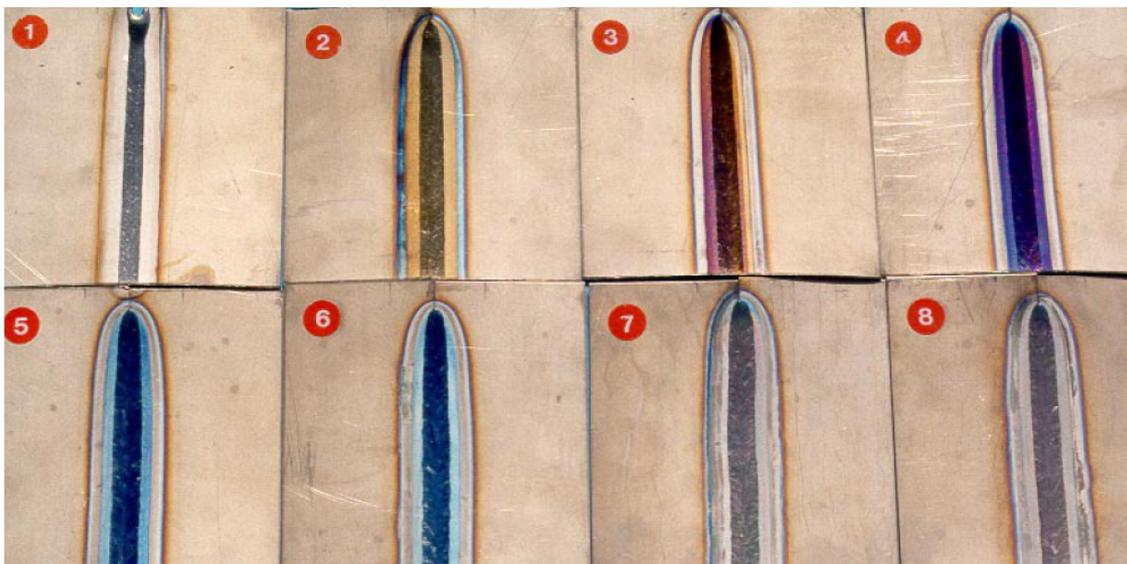


Abbildung 41 - Anlauffarben von Schweißverbindungen [P11, S.27]

Für eine genaue Analyse der Schweißnahtqualität für sicherheitsrelevante Bauteile sind jedoch andere Verfahren wie beispielsweise die Radiographie oder die Schweißnaht Härteuntersuchung notwendig.

### ***I.IV Reibschweißverbindungen***

Bei den Reibschweißverfahren wird zwischen Linear- und Rotationsreibschweißen unterschieden. Dabei wird jeweils ein Bauteil auf der Maschine fixiert und das anzuschweißende Bauteil in Bewegung versetzt. Anschließend wird das bewegte Bauteil unter hohem Druck an das fixierte gepresst. Die dabei entstehende Reibungswärme verschweißt die beiden Komponenten.

*Vorteile:*

- § gute Reproduzierbarkeit
- § keine Atmosphärenabschirmung notwendig
- § sehr gute Schweißnahtqualität → statische und dynamische Festigkeit besser als beim Grundwerkstoff

*Nachteile:*

- § begrenzte Bauteilabmessungen
- § aufwendige Vorrichtungen → nicht für Einzelanfertigung geeignet
- § geringe Verfügbarkeit von Linearschweißtechnik

### ***IV.V Lötverbindungen***

Titanwerkstoffe wurden bereits erfolgreich mit Silber, Aluminium- und Titanloten gelötet. Aufgrund der Korrosionsanforderungen in der Meerestechnik werden ausschließlich Titanlote (Bsp. TiCu15Ni15, TiZrCuNi) empfohlen, die jedoch eine hohe Löttemperatur von 850 - 1000°C erfordern. Deshalb ist beim Löten wie bei den Schweißverfahren auf die Abschirmung von Temperaturbereichen >300°C gegen die Atmosphäre durch Vakuum zu achten.

*Vorteile:*

- § Verbindung von komplizierten Werkstückgeometrien möglich
- § Verbindung von unterschiedlichen Metallen möglich → Dabei ist unbedingt die Verträglichkeit der Verbindung im Hinblick auf Kontaktkorrosion zu prüfen!

*Nachteile:*

- § geringe Produktivität
- § Anwendung nur im Vakuum möglich
- § Risiko für Kontaktkorrosion

### **IV.VI Klebeverbindungen**

Das Kleben von Reintitan und Titanlegierungen stellt eine kostengünstige Alternative zu den Schweiß- oder Hartlötverfahren dar, wobei auch Metall-Nichtmetall-Verbindungen möglich sind. Allerdings sind dabei Festigkeitsverluste in der Klebezone zu berücksichtigen.

*Vorteile:*

- § hohe Produktivität
- § Metall - Nichtmetall - Verbindungen möglich

*Nachteile:*

- § geringe Festigkeit der Klebestelle
- § Alterung des Klebers in Seewasserumgebung möglich

### **IV.VII DAVEX - Verfahren**

Das DAVEX-Verfahren ist ein Walzverfahren zum formschlüssigen Verbinden von Halbzeugen. Dabei können auch unterschiedliche Werkstoffe (Bsp. Stahl und Titan) miteinander verbunden werden. In der folgenden Abbildung ist das Verfahren dargestellt:

#### **DAVEX<sup>®</sup>-Produktionsprinzip**



#### **DAVEX<sup>®</sup>-Verbindung**



Abbildung 42 - Davex-Verfahren [www.davex.de, 30.06.2009]

*Vorteile:*

- § Verbindung von unterschiedlichen Materialien möglich
- § keine Wärmeeinbringung → keine Versprödung des Titans
- § hohe Fügegeschwindigkeit
- § geringer Vorfertigungsaufwand (lediglich Fräsen der Nuten)

*Nachteile:*

- § spezielle Vorrichtung für jede Anwendung notwendig
- § Auftreten von Kontaktkorrosion möglich

***IV.VIII Fazit***

Aufgrund der vielfältigen Fügemöglichkeiten besitzt der Werkstoff Titan nahezu die gleichen Kombinationsmöglichkeiten wie der Werkstoff Stahl und bietet somit eine ähnliche Flexibilität in der konstruktiven Systemauslegung.

## V Verzeichnisse und Quellenangaben

Alle Literaturquellen sind im Hauptdokument angeführt.

### **Abbildungsverzeichnis Anhang**

Abbildung 1 - Phasendiagramm Reintitan [P24, S.8].....	2
Abbildung 2 - Beeinflussung des Phasendiagramms [P24, S.9].....	2
Abbildung 3 - Einteilung der Legierungen aufgrund ihrer Kristallstruktur [P1, S.304].....	3
Abbildung 4 - Prozessfenster - lamellares Gefüge [P18, S.31+32].....	4
Abbildung 5 - Prozessfenster - globulares Gefüge [P18, S.34].....	4
Abbildung 6 - martensitisches Gefüge von TiAl6V4 [P1, S.15].....	5
Abbildung 7 - Prozessfenster - bimodales Gefüge [P18, S.35].....	5
Abbildung 8 - bimodales Gefüge von TiAl6V4 [P1, S.16].....	6
Abbildung 9 - Beispiel für Thermomechanische Behandlung [P1, S.13].....	7
Abbildung 10 - qualitativer Werkstoffvergleich Zug-Dehnungskurven.....	10
Abbildung 11 - qualitative Druck-Stauchungskurven.....	11
Abbildung 12 - Hochgeschwindigkeitsverformung [P33 S.15].....	12
Abbildung 13 - Dauerschwingverhalten TiAl6V4 in Abhängigkeit von der $\alpha$ -Korngröße [P1 S.169].....	14
Abbildung 14 - Zugeigenschaften in Abhängigkeit vom Verformungsgrad [P22, S.35].....	15
Abbildung 15 - Ansprengung einer Korvette [F4].....	16
Abbildung 16 - Messaufbau Spannungsreihe [www.chemgapedia.de, 15.06.2010].....	19
Abbildung 17 - Oxidschichtbildung [P22, S.8].....	20
Abbildung 18 - Flächenkorrosion [I2].....	21
Abbildung 19 - Muldenkorrosion [I2].....	21
Abbildung 20 - Lochkorrosion [I2].....	22
Abbildung 21 - Anfälligkeit von Titanlegierungen gegen Loch- + Spaltkorrosion [P4, S.122].....	23
Abbildung 22 - Beispiel für galvanische Korrosion [P8 S.12].....	24
Abbildung 23 - Interkristalline Korrosion [I3].....	25
Abbildung 24 - Interkristalline Korrosion [I2].....	25
Abbildung 25 - Bewuchs an Schiffskomponenten [F1].....	26
Abbildung 26 - Korrosion am Wassertropfen [I3].....	27
Abbildung 27 - Spannungsrisskorrosion (l.: interkristallin, r.: transkristallin) [I2].....	28
Abbildung 28 - Wöhler-Kurve [I3].....	29
Abbildung 29 - Opferanoden am Uboot [F1].....	32
Abbildung 30 - Feingussteile [www.tital.de, 15.06.2010].....	33
Abbildung 31 - Rapid-Prototyping [www.gizmag.com, 15.06.2010].....	34
Abbildung 32 - kompliziertes Schmiedeteil: Lukendeckel.....	35
Abbildung 33 - Superplastisches Verformen [www.mpg.de, 15.06.2010].....	36
Abbildung 34 - Erodieren von Titan [www.alltec-precision.com, 15.06.2010].....	39
Abbildung 35 - Laser Colouring [www.industrial-lasers.com, 15.06.2010].....	41
Abbildung 36 - li: anodische Oxidation, re: Fixierelemente [P35, S.9].....	41
Abbildung 37 - TIG - Schweißen von Ti2 [P13, S.6].....	43
Abbildung 38 - Schutzgasschienenne [P11, S.19].....	45
Abbildung 39 - Elektronenstrahlschweißen [www.ptr-gmbh.de, 15.06.2010].....	48
Abbildung 40 - Vergleich der Wärmeeinflusszonen [P21, S. 11].....	49
Abbildung 41 - Anlauffarben von Schweißverbindungen [P11, S.27].....	49
Abbildung 42 - Davex-Verfahren [www.davex.de, 30.06.2009].....	51

## **Tabellenverzeichnis Anhang**

Tabelle 1 - Chemische + physikalische Eigenschaften .....	1
Tabelle 2 - Gefügeeinfluss auf die mechanischen Kennwerte [P1, S.13] .....	6
Tabelle 3 - Reintitan und Titanlegierungen [N12], [P1, S.20 ff.].....	9
Tabelle 4 - E-Modul + Poissonzahl [P17, S. E102] .....	12
Tabelle 5 - Dauerschwingfestigkeiten [P1 S.169ff.], [P17 S. E104], [P23 S.278] .....	14
Tabelle 6 - Schockresistenz verschiedener Werkstoffe [P27 S.122-124] .....	16
Tabelle 7 - Elektrochemische Spannungsreihe.....	19
Tabelle 8 - Abtragungsraten von TiAl6V4 [P4, S.122] .....	30
Tabelle 9 - Kavitationskorrosion - Werkstoffvergleich [P23, S.503] .....	30
Tabelle 10 - Korrosionstabelle [N2], [P4], [P5], [P6].....	31
Tabelle 11 - Schweißbarkeit von Titanwerkstoffen [P11, S.4].....	44
Tabelle 12 - Festigkeiten im Schweißnahtbereich (TIG) [P11, S.5] .....	45
Tabelle 13 - Festigkeiten im Schweißnahtbereich (MIG) [P11, S.6] .....	46

# Lebenslauf

## persönliche Daten

---

Vor- und Familienname	Andreas Malletschek
Geburtstag	17. März 1982
Geburtsort	Lutherstadt Wittenberg
Familienstand	ledig

## Schulbildung

---

Sept. 1988 – Juli 1992	Heideschule Gossa
Aug. 1992 – Juli 2000	Paul-Gerhardt-Gymnasium Gräfenhainichen

## geleisteter Wehrdienst

---

Juli 2000 – April 2001	Grundwehrdienst bei der Bundeswehr
------------------------	------------------------------------

## akademischer Werdegang

---

Okt. 2001 – Sept. 2006	Maschinenbau - Studium an der Technischen Universität Ilmenau, Fachrichtung Allgemeiner Maschinenbau und Fahrzeugtechnik, Abschluss: Diplom-Ingenieur im September 2006
März bis August 2006:	Gasthörerschaft im Studiengang Schiffbau an der Fachhochschule Kiel von
seit März 2011	Lehrbeauftragter im Fach Maschinenelemente an der Fachhochschule Kiel

## Berufstätigkeit

---

Sept. 2002 – Juni 2005	Werkstudent bei der RMM GmbH & Co KG
Juli 2006 – August 2006	Praktikum beim Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung - Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen, Schiffsmaschinenbau
Okt. 2006 – Sept. 2010	Entwicklungsingenieur bei der Howaldtswerke - Deutsche Werft GmbH, Abt. Ubootausrüstung
seit Oktober 2010	Gruppenleiter im Bereich Konstruktion maschinenbaulicher Komponenten bei der Howaldtswerke Deutsche Werft GmbH