



BELEGARBEIT
STOFFSTROM- &
RESSOURCENMANAGEMENT

TITAN – ÖKOBILANZ &
WERTSCHÖPFUNGSKETTE
AM BEISPIEL EINES TITANMESSERS

Bearbeiterin: Katharina Görz

Matrikelnummer: 20063060

Hochschule Magdeburg – Stendal

Fachbereich Wasser- und Kreislaufwirtschaft

Masterstudiengang Ingenieurökologie

Abgabetermin: 31.03.2015

Inhalt

1. Einleitung.....	2
2. Der Rohstoff Titan.....	2
2.1 Eigenschaften.....	2
2.2 Vorkommen.....	3
2.3 Gewinnung.....	3
2.3.1 Minenabbau.....	3
2.3.2 Produktion und Reserven.....	4
2.3.3 Herstellung.....	6
2.4 Anwendung und Produkte.....	9
2.5 Bedarf.....	10
2.6 Recycling.....	10
2.7 Preis.....	12
3. Stoffstromanalyse.....	13
3.1 Allgemeine Stoffstromanalyse von Titan.....	13
3.2 Stoffstromanalyse am Beispiel eines Titanmessers.....	17
3.2.1 Ziel der Ökobilanz.....	17
3.2.2 Untersuchungsrahmen.....	18
3.2.3 Sachbilanz.....	20
3.2.4 Wirkungsabschätzung.....	22
3.2.5 Auswertung der Ökobilanz.....	25
4. Quellen.....	27
4.1 Literaturquellen.....	27
4.2 Internetquellen.....	28
4.3 Abbildungs- und Tabellenquellen.....	28
5. Abbildungsverzeichnis.....	30
6. Tabellenverzeichnis.....	30

1. Einleitung

Titan ist ein noch junger Werkstoff, der erst Ende des 18. Jahrhunderts von William Gregor in England entdeckt wurde. Die Produktion von reinem Titan-Metall war erst ab den 40er Jahren des 20. Jahrhunderts möglich, womit sich seine kommerzielle Nutzung erschloss. Erste Legierungen mit Titan brachten zum damaligen Zeitpunkt Neuerungen in der Luft- und Raumfahrt. Heutzutage ist der Werkstoff in sämtliche weitere Industriezweige vorgedrungen und findet Anwendung in der chemischen Industrie (Farben, Lacke, Papier, Kunststoffe, etc.), Energie- und Automobilindustrie, Medizintechnik usw., aber auch bei Produkten des alltäglichen Gebrauchs. Zu letzterem Bereich zählen Freizeit- und Schmuckfabrikate, aber auch Gegenstände wie Titanmesser. Anhand eines solchen Messers soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit beispielhaft eine Ökobilanzierung, sowie Darstellung der zugehörigen Wertschöpfungskette erfolgen, um einen Einblick in die Umweltwirkungen von Titanprodukten entlang ihres gesamten Lebensweges zu erhalten. Dazu gehört zunächst die allgemeine Betrachtung der Ressource in Hinblick auf das Vorkommen, den Herstellungsprozess, die Produktion und Reserven, Anwendungsgebiete usw., bevor die konkrete Stoffstromanalyse erfolgt.

2. Der Rohstoff Titan

2.1 Eigenschaften

Titan ist ein metallisch weiß glänzendes Leichtmetall mit geringer Dichte bzw. Gewicht, weist aber zugleich eine hohe Festigkeit und Härte auf, weshalb seine Namensgebung auch in Anlehnung an das griechische Göttergeschlecht erfolgte. In entsprechend legiertem Zustand erreicht das Metall nahezu die Zugfestigkeit von hochfesten Stählen, obwohl es nur etwas mehr als die Hälfte des Gewichtes von Eisen aufweist. Aufgrund des komplizierten Herstellungsverfahrens (Kroll-Prozess) liegt der Preis von Titan jedoch auch 200-fach über dem von Rohstahl und ist damit eines der teuersten Metalle. Titan ist nur schwach magnetisch und sehr korrosionsbeständig. Zusätzlich zeigt es eine gute Körperverträglichkeit, da es inert und absolut ungiftig ist.

2.2 Vorkommen

In der Erdkruste kommt Titan mit einer Konzentration von 0,6 % vor und ist damit das neunthäufigste Element. Es liegt nur in Verbindungen mit Sauerstoff als Oxid vor und ist als reines Metall kaum in der Erde auffindbar. Die Gewinnung von Titan erfolgt hauptsächlich aus den Erzen Ilmenit und Rutil, aber auch Anatas, wobei es sich um die häufigsten Titanminerale handelt (siehe Abbildung 1). Titan ist oftmals mit Eisen vergesellschaftet, weshalb bei der Verhüttung von Eisenerz auch titanhaltige Schlacken entstehen.

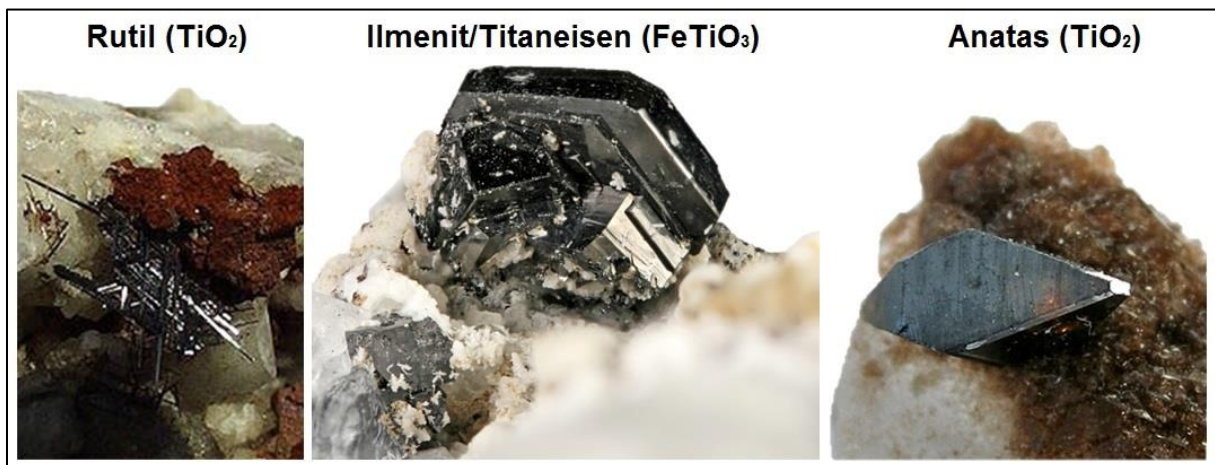


Abb.1: Häufigste Titanminerale^[1]

2.3 Gewinnung

2.3.1 Minenabbau

Der Abbau von Titanerzen erfolgt im Tagebau; hierzu zählen primäre magmatische, als auch sekundäre Lagerstätten (Seifen).

Die bedeutendste Eisen-Titan-Lagerstätte Europas ist die Tellnes-Lagerstätte in Süd-Norwegen mit einer Tiefe von 150 m, geplant bis zu 400 m (siehe Abbildung 2). In Bezug auf das Erz Ilmenit handelt es sich um eine der größten primären Lagerstätten mit schätzungsweise 37 Mio t Reserven, was 7 % der weltweiten Reserven ausmacht (Rang 6 bei der Länderverteilung der globalen Titandioxid-Reserven). Der Abbau im Tagebau erfolgt mit Bohr- und Sprengverfahren, was zwangsläufig einen starken landwirtschaftlichen Eingriff in die Natur bedeutet. Hier müssen 2 Mio t Erz und 1,6 Mio t Nebengestein abgebaut werden, um 0,58 Mio t Ilmenitkonzentrat zu erhalten. Das entspricht 0,26 Mio t Titan. Der Hauptabnehmer der norwegischen Ilmenitexporte ist die Pigmentindustrie für Farben und Lacke.



Abb.2: Tellnes-Ilmenit-Lagerstätte^[2]

2.3.2 Produktion und Reserven

Für das Jahr 2012 konnte eine Produktion von ca. 7 Mio t Titandioxid verzeichnet werden (siehe Tabelle 1). Dieser Wert setzt sich zusammen aus dem Abbau von 6,2 Mio t Ilmenit und 830000 t Rutil. Geographisch konzentrierten sich die Reserven im selben Jahr zu 20 % in Australien, zu 16 % in Südafrika und mit einem Anteil von 10 % in Kanada, sowie auch zu 10 % in China.

Titan zählt mit zu den Metallen, die weltweit die größten Reserven aufweisen. Wie in der nachfolgenden Tabelle 1 zu sehen ist, betragen die Reserven im Jahre 2012 insgesamt ungefähr 701 Mio t an Titandioxid. Davon entstammen rund 650 Mio t aus Ilmenit, 42 Mio t aus Rutil und der Rest aus anderen Titanerzen. Damit verteilt sich die geographische Konzentration der Reserven derart, dass China mit knapp 30 % den größten Anteil daran hat, gefolgt von Australien mit ca. 17 % und Indien mit 13 % Anteil an den weltweiten Reserven.

Die in Tabelle 1 aufgelisteten Länder decken 99% der Jahresproduktion und 96 % der Reserven von Ilmenit und Rutil ab.

Land	Produktion 2012 (kt)	Reserven 2012 (Mt)
Australien	1420	118
Brasilien	50	44,2
Kanada	700	31
China	700	200
Indien	575	92,4
Madagaskar	280	40
Mosambik	388	16,5
Norwegen	350	37
Südafrika	1161	71,3
Sierra Leone	100	3,8
Sri Lanka	60	n.V.
Ukraine	360	8,4
USA	300	2
Vietnam	500	1,6
andere Länder	57	26,4
Summe	7001	701

Tab.1: Länderverteilung der Produktion und Reserven von Titandioxid^[3]

Aus dem Quotienten von Reservemenge und Produktion lässt sich die statische Reichweite ermitteln. Sie gibt Auskunft darüber, wie viele Jahre die aktuell bekannten Reserven ausreichen würden (ohne Erschließung neuer Erzvorkommen), um eine gleichbleibende Jahresproduktion zu gewährleisten. Für die Titan-Reserven beträgt die statische Reichweite 100 Jahre, womit der Rohstoff als sehr sicher gilt. Noch sicherer ist die statische Ressourcenreichweite mit einem Wert von ca. 290.

Auskunft über die Marktkonzentration der Förderländer gibt der Herfindahl-Hirschmann-Index. Bezogen auf das Jahr 2012 betrug dieser 0,113 für die Produktion von Ilmenit und Rutil. Dies bedeutet nach Tabelle 2 eine mittelmäßige Marktkonzentration.

Herfindahl-Hirschmann-Index		
niedrig	mittelmäßig	stark
0 – 0,1	0,1 – 0,25	0,25 - 1

Tab.2: Bewertungsskala zur Analyse der Marktkonzentration nach HHI (1 = Monopol)^[4]

Das Länderrisiko des Abbaus analysiert, inwieweit die politische Stabilität eines Staates die zukünftige Versorgung eines Rohstoffes beeinflusst und wird mit kritisch bis unkritisch bewertet (siehe Tabelle 3). Das Gesamtländerrisiko für Ilmenit und Rutil, bezogen auf das Jahr 2012, beträgt 0,25, womit sich ein mäßiges Versorgungsrisiko hinsichtlich der Regierungsführung der Hauptförderländer ergibt.

Länderrisiko		
unkritisch	Mäßig kritisch	kritisch
2,5 bis 0,5	0,5 bis -0,5	-0,5 bis -2,5

Tab.3: Bewertungsskala für das Länderrisiko^[4]

Betrachtet man den Rohstoffabbau von Titan anhand der Umweltleistungen der Produktionsländer, so fällt auf, dass die Gewinnung von Ilmenit und Rutil hauptsächlich in solchen Ländern stattfindet, die durch schwache Umweltleistungen geprägt sind. Das bedeutet, dass die Förderländer charakteristisch sind für Umweltschäden durch Landwirtschaft, Luft- und Wasserverschmutzungen etc. Analysiert werden konnte dies anhand des EPI (Environmental Performance Index), der für Titan, in Form von Ilmenit und Rutil, zwischen 44 und 47 liegt und somit gemäß Tabelle 4 in die Kategorie „schwach“ einzuordnen ist.

EPI-Umweltleistungen der Produktionsländer				
sehr stark	stark	mittel	schwach	sehr schwach
100-67	67-57	57-49	49-39	39-0

Tab.4: Bewertungsskala nach EPI-Umweltleistung (Environmental Performance Index)^[4]

Die in diesem Kapitel genannten Daten beruhen auf den Angaben des USGS (U.S. Geological Survey), dem größten geologischen Institut weltweit. Werden andere Datenquellen herangezogen, so können die Werte, besonders in Bezug auf die jährlichen Produktionsmengen der Titanerze, teilweise stark voneinander abweichen.

2.3.3 Herstellung

Aus den Titanerzen werden hauptsächlich 2 Produkte hergestellt: Titan-Schwamm (reines metallisches Titan) und Titandioxid. Das Zwischenprodukt bei beiden Produkten ist jeweils Titan-tetrachlorid, wie auch schematisch in Abbildung 3 angedeutet.

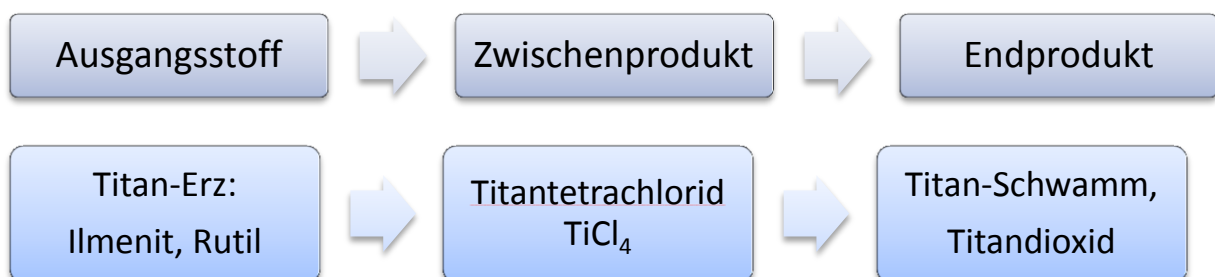
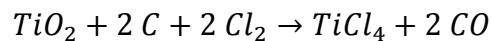


Abb.3: Ausgangs-, Zwischen- und Endprodukte bei der Titanherstellung

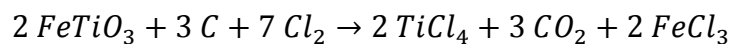
Nach dem direkten Minenabbau des Rohstoffes (Ilmenit, Rutil) in den Lagerstätten wird dieser zunächst in einem Separationsverfahren gereinigt und von Nebengesteinen getrennt. Dies kann durch Dichte-, Elektro- und Magnetsortierung erfolgen. Im Anschluss erfolgt die Laugung, bei der es zur Wäsche mit Säuren (Schwefelsäure) kommt, um den Rohstoff von Phosphor, Schwefel und Ölrückständen zu befreien. Bevor es dann zum zentralen Chloridverfahren kommt, werden die gewaschenen Erze in Drehrohröfen getrocknet.

Bei der Chlorierung dann erfolgt die Umsetzung der Titanminerale mit Chlorgas und Kohlenstoff bzw. Koks zu Titan-tetrachlorid. Die Reaktionsgleichungen mit Rutil, als auch Ilmenit, als Ausgangsstoff sind nachfolgend dargestellt:

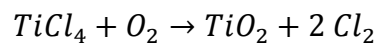
Rutil:



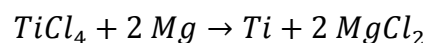
Ilmenit:



Wird als Endprodukt Titandioxid gewünscht, so wird das Titan-tetrachlorid oxidiert:



Zur Herstellung von reinem Titan-Schwamm wird das Titan-tetrachlorid durch Destillation gereinigt und dann dem komplizierten und teuren Kroll-Verfahren unterzogen. Hierbei geschieht eine Reduktion mit Magnesium, die sich durch folgende Gleichung beschreiben lässt:



Zuletzt wird bei der Raffination das entstandene Titan durch das Herauslösen mit verschiedenen Salzsäuren oder durch Vakuumdestillation gereinigt bzw. veredelt. Nun kann die Weiterverarbeitung durch das Umschmelzen von Titan-Schwamm zu Titan-Ingots (Barren) erfolgen.

Die nachfolgende Abbildung (Abb.4) zeigt die zuvor genannten Herstellungsschritte in einer grafischen Schematik.

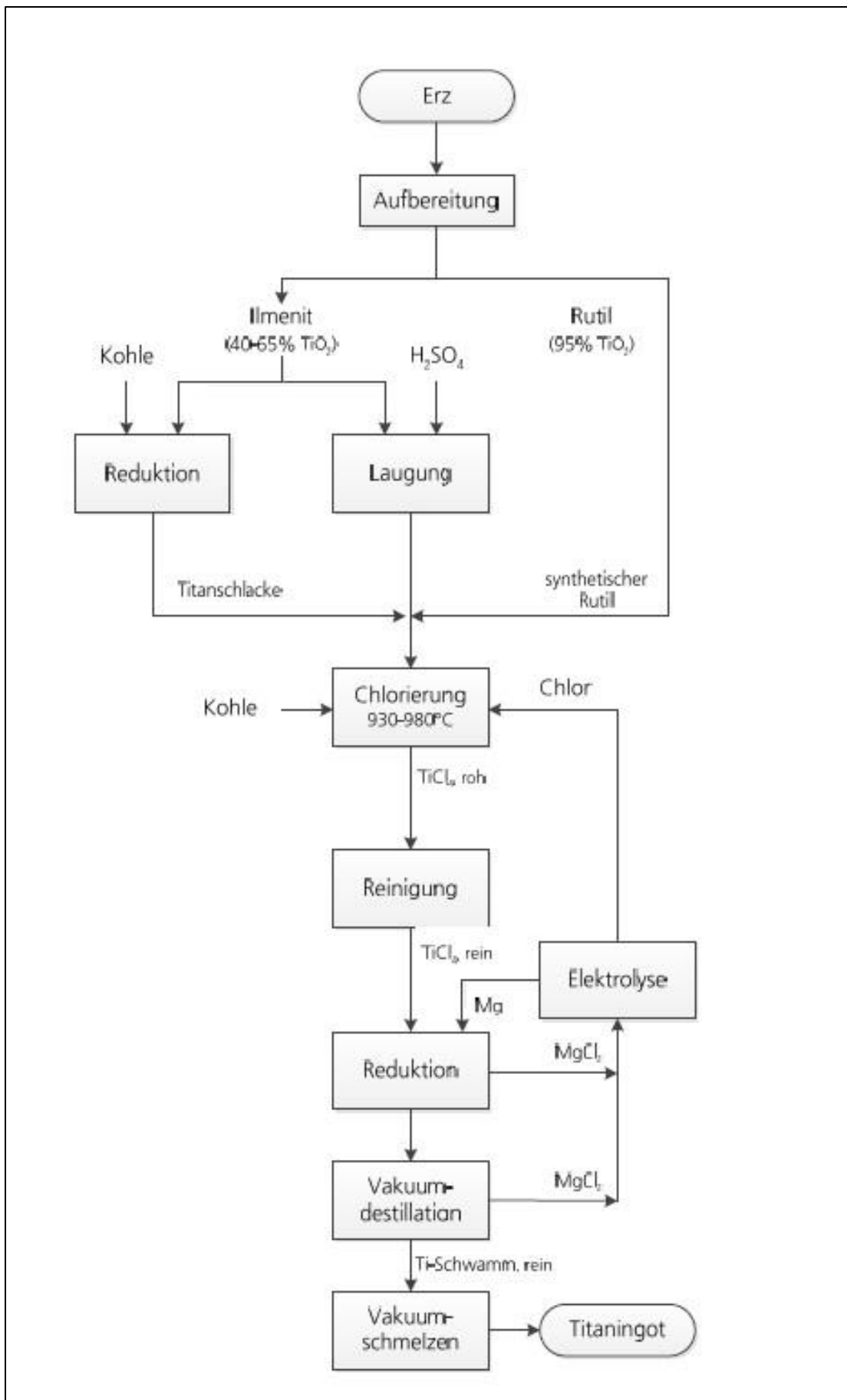


Abb.4: Herstellung von Titan^[4]

2.4 Anwendung und Produkte

Wie bei der Herstellung von Titan bereits erwähnt, existieren 2 Nutzungsformen von Titan: Titandioxid-Kristalle und metallisches Titan. Letzteres macht tatsächlich nur ungefähr 5 % der Titannutzung aus. Als reines Metall findet Titan u.a. in der Bau-, Automobilindustrie, als auch in der Verkehrstechnik Anwendung, z.B. als Einsatzmaterial von Turbinenschaufeln (Abb.5 links). Aber auch in der Medizintechnik findet der Einsatz von Titan großflächig statt und reicht von Operationsbestecken, über Implantate bis hin zu Prothesen (siehe Abbildung 5 rechts). Die gute Biokompatibilität und die glänzende Optik machen den Werkstoff aber auch in der Schmuckindustrie sehr beliebt, in Form von Ketten, Ringen (Abb.5 mittig) usw. Darüber hinaus werden auch Sportgeräte und Haushaltsgegenstände produziert, die ganz oder teilweise aus Titan geformt sind.



Abb.5: Titanprodukte. Links: Turbinenschaufel, mittig: Schmuckring, rechts: Kniegelenkprothese^[5]

Als Legierung wird Titan unter anderem in der Luft- und Raumfahrt, als auch in der Energie- und Meerestechnik eingesetzt, da in diesen Bereichen die hohe Korrosionsbeständigkeit als auch gleichzeitige Härte und Leichtigkeit des Metalls von großer Bedeutung sind.

Zum größten Teil wird Titan aber als Pigment, d.h. als Titandioxid, eingesetzt. Die Hauptanwendungsbereiche sind in Tabelle 6 dargestellt und zeigen, in Bezug auf das Jahr 2012, die Verwendung von TiO_2 zu 60 % in der Farb- und Lackindustrie, zu 25 % für Kunststoffe, zu 10 % in der Papierindustrie und zu 5 % in sonstigen Bereichen, wie z.B. Fasern, Gummi, Kosmetik, Lebensmittel, etc.

Anwendungsbereiche von Titandioxid (Stand 2012)			
Farben und Lacke	Kunststoff	Papier	sonstige
60 %	25 %	10 %	5 %

Tab.6: Anteile der Hauptanwendungsbereiche von TiO_2 ^[6]

2.5 Bedarf

Um einen Ausblick in die Zukunft zu erhalten, existieren Schätzungen zum globalen Rohstoffbedarf von Titan für Zukunftstechnologien. Dazu ist in der nachfolgenden Tabelle 7 der Bedarf von 2006 dargestellt, sowie der vermutete Bedarf von Titan im Jahre 2030, bezogen auf die gesamte Weltproduktionsmenge zum Zeitpunkt des Jahres 2006.

Titanbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t		
Technologie	Bedarf 2006	Bedarf 2030
Miniaturisierte Kondensatoren	177	1.140
Meerwasserentsalzung	14.700	55.300
Orthopädische Implantate	520	1.600
Farbstoffsolarzellen	0	108
Titanbedarf	15.397	58.148
Titanbedarf / Titanproduktion 2006	0,08	0,29

Tab.7: Titanbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien^[7]

Wie Tabelle 7 zeigt, wurde der Titanbedarf nur für Zukunftstechnologien ermittelt. Allerdings wird aber auch von der Automobilindustrie eine hohe Nachfrage für die Zukunft erwartet, was jedoch durch die hier verwendete Quelle (Fraunhofer ISI und IZT gGmbH) nicht eingehender untersucht wurde. Besonders im Bereich der Meerwasserentsalzungsanlagen wird ein zunehmender Bedarf geschätzt mit einer Steigerung von ca. 27 %. Es wird aber auch davon ausgegangen, dass der Titanbedarf für orthopädische Implantate, Farbstoffsolarzellen und miniaturisierte Kondensatoren vermehrt nachgefragt wird. In Summe rechnet man mit einer Steigerung des Titanbedarfs von 8 % (im Jahr 2006) auf 29 % (im Jahr 2030).

2.6 Recycling

Zu Titandioxid konnten in verschiedenen Literaturquellen, als auch durch direkte Patentrecherchen von Autoren unterschiedlicher Literaturquellen, keine marktfähigen Recyclingprozesse ermittelt werden. Dennoch ist bekannt, dass in Bezug auf Titandioxid Rückgewinnungsverfahren durchgeführt werden. Liegt Titan allerdings als Metall vor, so kann es verhältnismäßig leicht rezykliert werden.

Bekannt ist hier vor allem das Titan-Recycling im Flugzeugbau, da in der Luftfahrtindustrie große Mengen an Titanschrott anfallen. Dieser kann wieder zu Titaningots eingeschmolzen und anstelle von neu produziertem Titanschwamm eingesetzt werden.

Die nachfolgende Tabelle 8 zeigt in Bezug auf das Jahr 2006 für Titan einen Schrottanteil von 11 % (Anteil an Titanabfall aus dem Endverbrauch im gesamten Abfallaufkommen) und einen Recyclinganteil von 52 % (Anteil an recyceltem Titan in der globalen Titanherstellung).

Titan	Schrottanteil	Recyclinganteil an gesamter Produktion
%	11	52

Tab.8: Recyclinganteile von Titan (USGS, Stand 2006)^[4]

Auch die nachfolgenden Grafiken zeigen den prozentualen Anteil an recycelten Titan in den USA, sowie eine kalkulierte Abschätzung des weltweiten Titan-Recyclings. Wie in Abbildung 6 zu sehen, betrug von 1992 bis 2007 das Recycling in den USA im Schnitt 45 %. Global betrachtet gab es schätzungsweise eine Zunahme des Recyclings von 40 % auf 50 %.

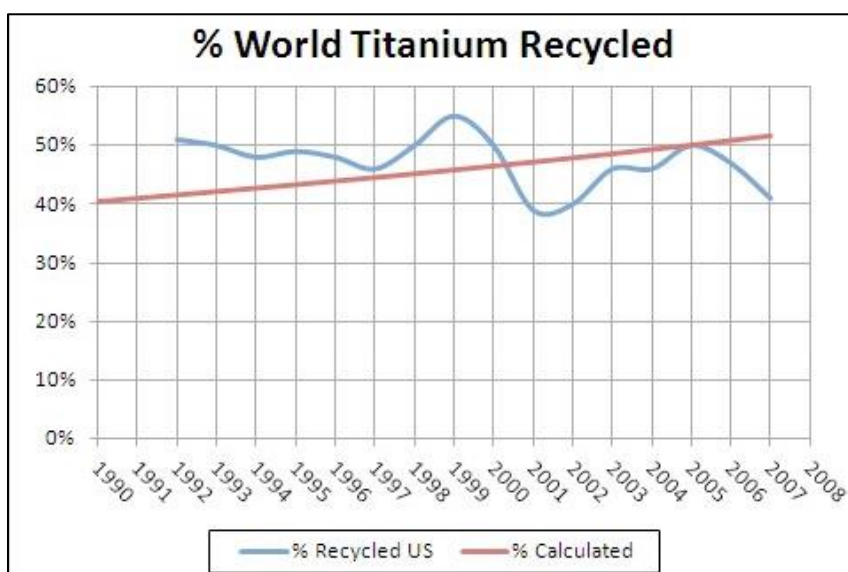


Abb.6: Weltweites und US-Titan-Recycling von 1990 bis 2008^[8]

Abbildung 7 zeigt einen Ausblick der globalen Recyclingquote für die Zukunft. Es ist zu erkennen, dass das Recycling im Jahre 2030 vermutlich eine Quote von 70 % haben wird und ab 2060 sogar 80 % erreichen kann. Bis 2200 wird erwartet, dass nahezu 85 % des Titanschrotts rückgewonnen werden können.

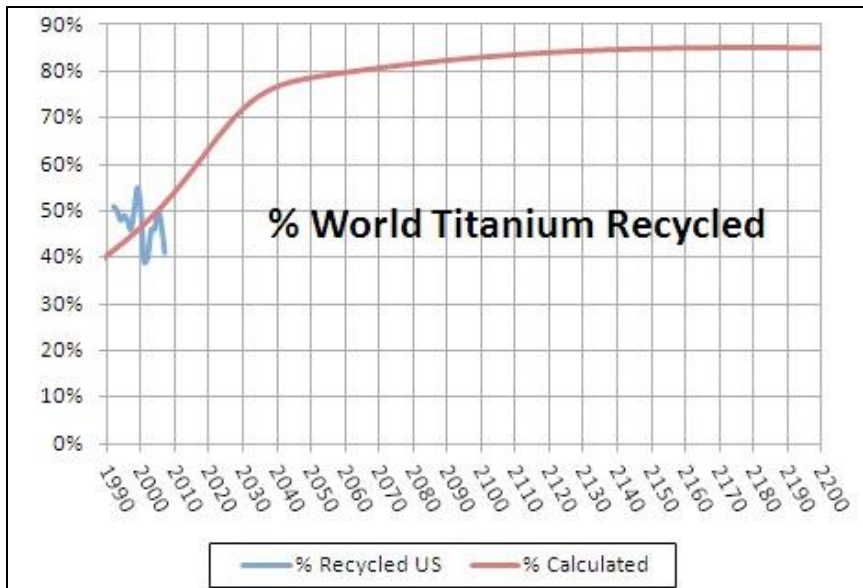


Abb.7: Weltweites und US-Titan-Recycling von 1990 bis 2200^[8]

2.7 Preis

Betrachtet man die Preisentwicklung von Titan (Abbildung 8), so ist zu sehen, dass der Spitzenwert im Jahre 2006 lag und rund 17-18 US-\$/kg betrug. Dies lässt sich auf die damalige verstärkte Nachfrage nach Titan als Leichtmetall im Flugzeugbau zurückführen. Nach einem anschließenden Fall der Titanpreise kam es ab 2010 wieder zu einem Anstieg, da es erneut zu Nachfragen aus dem Flugzeugbau kam, aber auch der Bedarf an Titan für die Farbherstellung und als Mikrolegierungsbestandteile für Edelstähle zunahm. Im Halbjahr 2013 betrug der Titan-Preis 8 US-\$/kg.

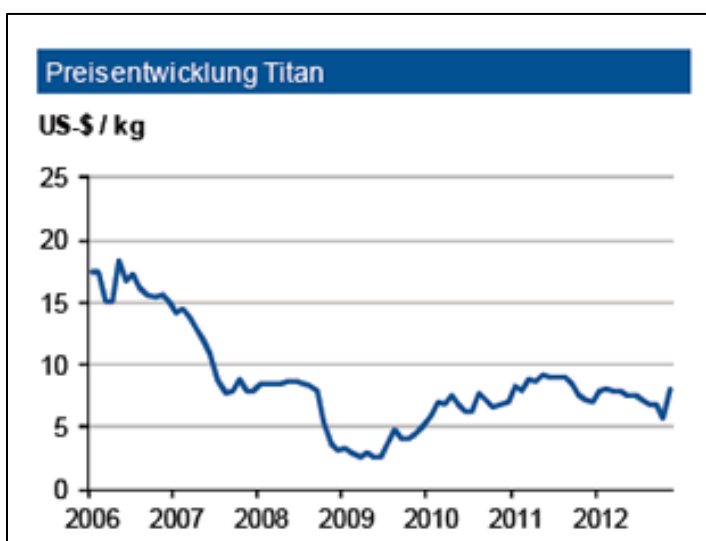


Abb. 8: Preisentwicklung Titan^[9]

3. Stoffstromanalyse

3.1 Allgemeine Stoffstromanalyse von Titan

Stoffstrom für metallisches Titan (global):

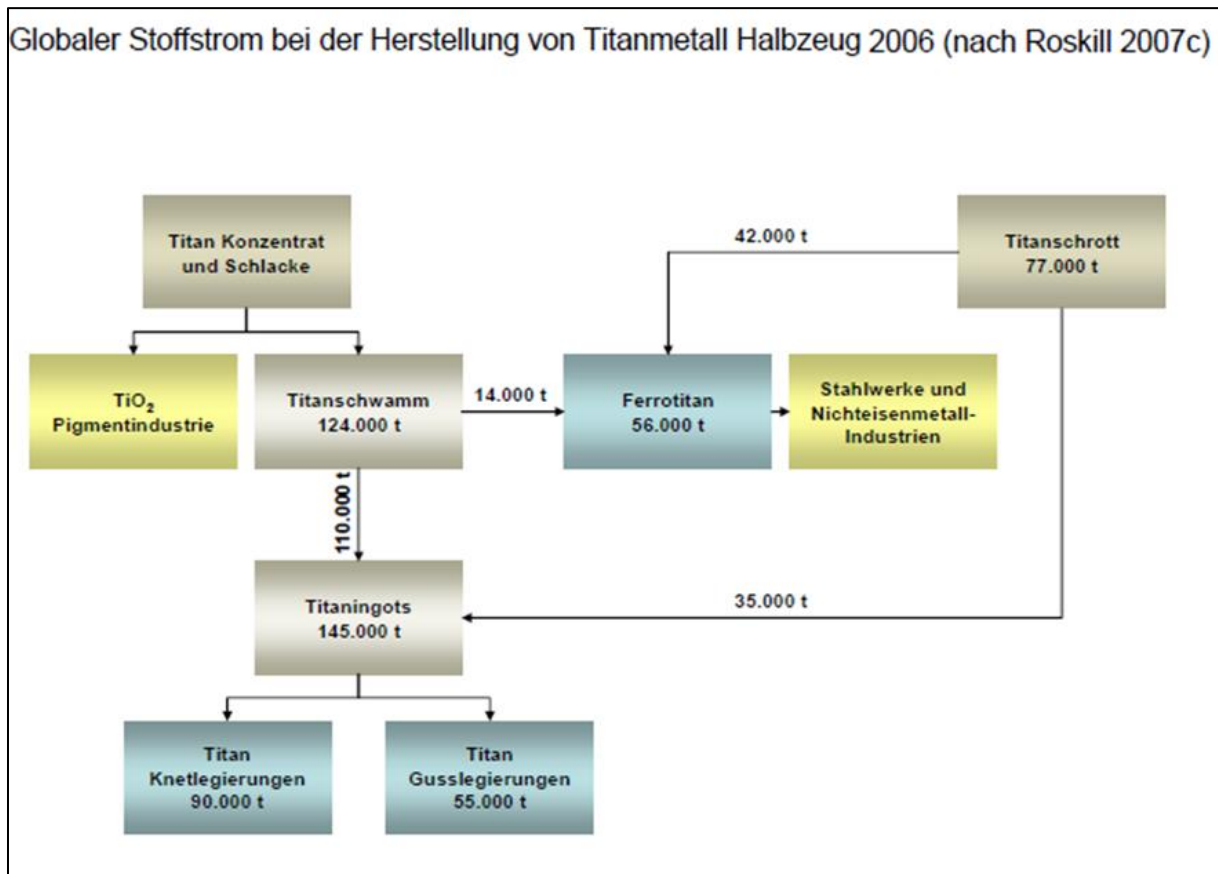


Abb.9: Stoffstrom für Titanmetall^[7]

Die obige Abbildung 9 zeigt den globalen Stoffstrom von Titanmetall im Jahre 2006. Nach dieser wurden aus den Rohstoffen Titanschwamm (aus Titankonzentrat und –schlacke), sowie 77000 t Titanschwamm summa summarum 201000 t Titanmetall-Halbzeug hergestellt. Dazu zählen also Titan-Knet- und –Gusslegierungen, als auch Ferrotitan für Stahlwerke und Nichteisenmetallindustrien. Die Verwendung von rückgewonnenem Titan macht in diesem Schema rund 38 % aus und ist aufgrund der hohen Titanpreise als auch wegen der Herkunft des Schrottes aus teils teuren High-Tech-Produkten sinnvoll.

Deutschland hat im Jahr 2006 9250 t Titanmetall und 13500 t Ferrotitan importiert.

Stoffstrom für Titandioxid (Deutschland):

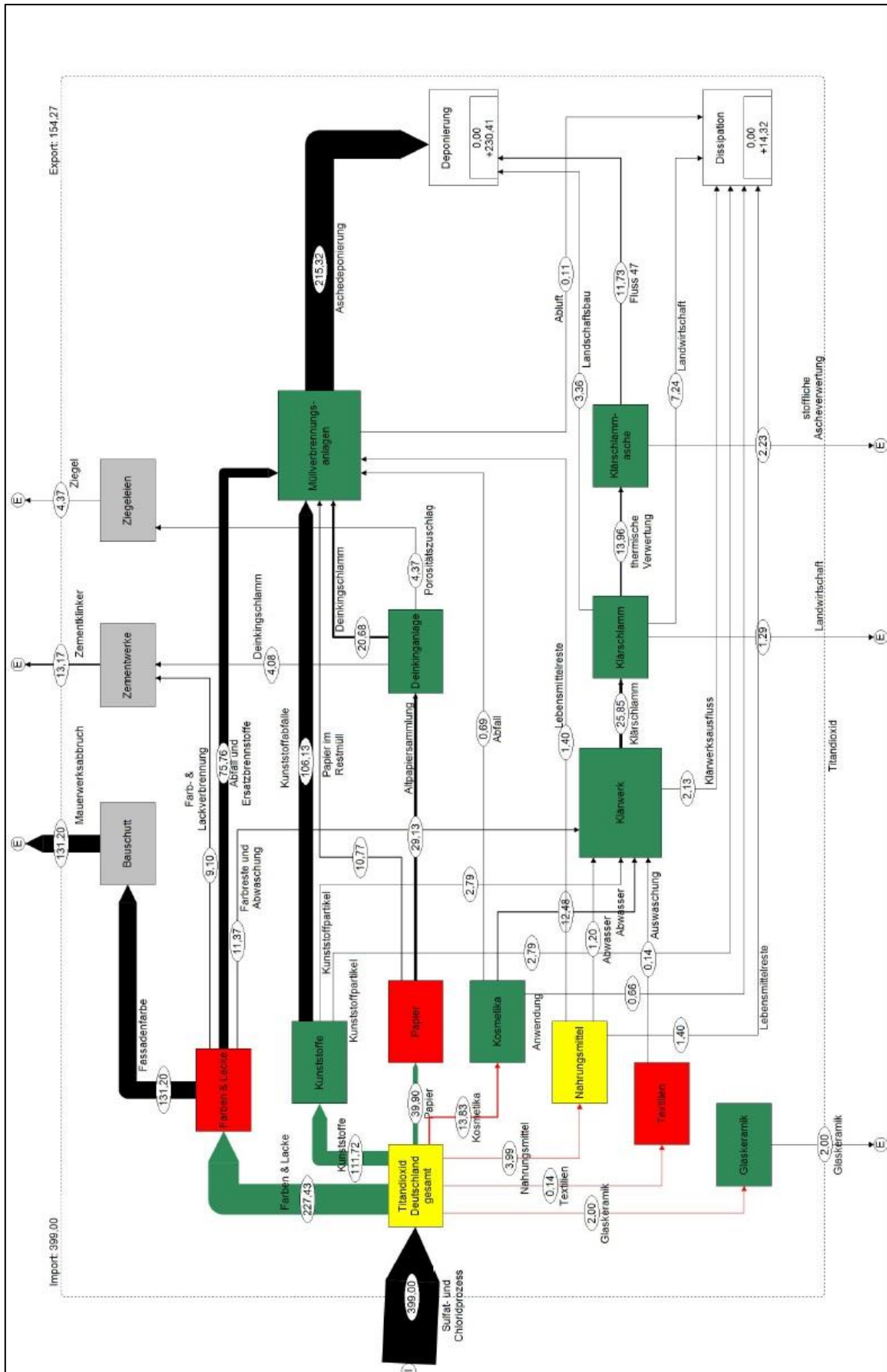


Abb.10: Stoffstrom für Titandioxid^[3]

In Abbildung 10 ist der Stoffstrom für die Titandioxid-Nutzung in Deutschland, bezogen auf das Jahr 2012, dargestellt. Dabei korrelieren die Pfeildicken positiv mit den relativen Mengenangaben, die in [kt] angegeben sind. Grüne Darstellungen basieren laut dem Autor der Quelle auf Messungen und Simulationen, gelb markierte Daten unterliegen zum Teil Annahmen und rote Markierungen sind sehr unsicher und basieren sehr stark nur auf Schätzungen.

Im Groben beschreibt die Darstellung, dass sich ein Input von 399 kt an Titandioxid zum größten Teil, d.h. zu insgesamt 85 %, auf die Bereiche Farben & Lacke, sowie Kunststoffe verteilt. Der restliche Anteil entfällt auf die Branchen Papier, Kosmetika, Nahrungsmittel, Textilien und Glaskeramik. Zur Senke hin werden 230,41 kt, das entspricht 99,95 %, an Titandioxid deponiert und entstammen überwiegend aus Müllverbrennungsanlagen, aber auch aus Klärschlamm und Klärasche. 0,05 % der Partikel werden in die Atmosphäre dissipiert.

Allgemeine Umweltbelastungen

In Abbildung 11 sind die allgemeinen Umweltwirkungen von Titan aufgezeigt (Stand 2010). Die Umweltbelastungen je Tonne Titandioxid - gemessen an den Ressourcenindikatoren „Kumulierter Rohstoffaufwand“, „Kumulierter Energieaufwand“, „Wasserbedarf“ und „UEBEL-Index“ sowie an der Human- und Ökotoxizität - sind sehr niedrig (grüne Farbgebung) und liegen weit unter denen von Rohstoffen wie Platin, Palladium, Osmium, Tantal, Kobalt, Wolfram usw.

Bei dem UEBEL-Index handelt es sich um ein Maß zur Umwelteinwirkungsbelastung, das vier Umweltwirkungen in sich vereint, um eine einheitliche Größe zur Gewichtung zu erhalten. Zu den im Index berücksichtigten Belastungen zählen Flächenbelastungen, Eutrophierung (Gewässerbelastung), Treibhauspotential (Klima) und Versauerung (Luftqualität).

Betrachtet man die Umweltwirkungen basierend auf der globalen Jahresproduktion, so zeigt sich Titan mit starken Umweltbelastungen (rote Farbgebung). Dies beginnt bei der nicht zu verachtenden Landschaftsveränderung durch die Flächeninanspruchnahme bei der Extraktion von Titanerzen und reicht bis hin zu einem hohen Wasserverbrauch bei der jährlichen Titandioxid-Produktion. Zusätzlich wird das Wasser bei der Rohstoffaufbereitung stark durch Säuren, Flotationschemikalien und Schwebstoffen belastet. Nicht zuletzt steigt auch die Luftbelastung aufgrund des beim Chlorierungsprozess freigesetzten Chlorgases. Für eine Übersicht wurden die bekanntesten Belastungen in der nachfolgenden Tabelle 9 zusammengetragen und bewertend nach Belastungsgrad eingestuft.

Umweltwirkungen			
Ressourcen-indikator	Einheit	je Tonne TiO ₂	je Weltjahresproduktion TiO ₂ 2010
Kumulierter Rohstoffaufwand	t	2,2	14 054 887
Kumulierter Energieaufwand	MJ	88,6	570 388 377
Wasserbedarf H ₂ O-Fußabdruck	m ³	71	455 932 722
UEBEL-Index		5,73 * 10 ⁻⁶ [UEBEL*a]	36,86 [UEBEL]
Human- und Ökotoxizität			
Indikator		je Tonne [t 1,4-DCB-Äquivalente]	je Weltjahresproduktion 2010 [kt 1,4-DCB-Äquivalente]
Humantoxizität		1	7 030
Ökotoxizität		18	118 291

- niedrig
- mittelmäßig
- stark

Abb.11: Umweltwirkungen von Titandioxid^[4]

Prozess	Belastungsgrad der Umweltbelastungen
Gewinnung	<ul style="list-style-type: none"> Landschaftsveränderung durch Flächeninanspruchnahme Luft- und Oberflächengewässerbelastung durch Sprenggase, Extraktion und Abfälle
Aufbereitung	<ul style="list-style-type: none"> Wasserbelastung durch Flotationschemikalien, Säuren und mineralischen Schwebstoffen Chlorierung: Luftbelastung durch freigesetztes Chlorgas
Verarbeitung	Reduktion, Raffination, Umschmelzen
Produktion	Bei spanender Bearbeitung: Wasserbelastung durch Kühlmittel
Deponierung	Keine relevanten Umweltbelastungen
Legende:	<div style="display: flex; flex-direction: column; gap: 5px;"> <div style="background-color: #FF0000; padding: 2px;">hochrelevante Umweltbelastungen</div> <div style="background-color: #FF4500; padding: 2px;">relevante Umweltbelastungen</div> <div style="background-color: #FF8C00; padding: 2px;">mässig relevante Umweltbelastungen</div> <div style="background-color: #FFD700; padding: 2px;">mässig-gering relevante Umweltbelastungen</div> <div style="background-color: #9ACD32; padding: 2px;">geringrelevante Umweltbelastungen</div> <div style="background-color: #008000; padding: 2px;">Umweltbelastungen nicht von Relevanz</div> </div>

Tab.9: Umweltbelastungen bei der Titanproduktion^[4,7]

Kurze Bewertung relevanter Aspekte

Im Vergleich zu vielen anderen Rohstoffen zeigt die Titanproduktion einen hohen UEBEL-Index als auch Energieverbrauch, wohingegen die Umweltbelastungen pro Rohstoffeinheit an Titan/Titandioxid mit am geringsten sind. Um den teuren und belastenden Herstellungsprozess zu umgehen, sind effizientere, umweltschonendere und zugleich kostengünstigere Methoden erforderlich. Alternativen bei der Titan-Herstellung unterliegen bisher aber noch den Entwicklungsarbeiten und Langzeitstudientests.

Obwohl Titan, sowohl als Metall als auch als Pigment, zur heutigen Zeit eine große industrielle Bedeutung hat, ist die zugängliche Literatur recht lückenhaft, ungenau oder teilweise gar widersprüchlich, auch wenn sie durch angesehene Institute freigegeben wurde (USGS, Fraunhofer, etc.). Dies lässt viele Analysen auf Schätzungen basieren. Um aber dennoch eine vollständige Ökobilanzierung im Bereich von Titanerzeugnissen zu präsentieren, wird stellvertretend im nachfolgenden Kapitel die Stoffstromanalyse anhand eines Titanmessers dargelegt. Dies hat das Ziel einen Einblick zu erhalten und evtl. eine Übertragbarkeit auf andere Titanprodukte zu ermöglichen.

3.2 Stoffstromanalyse am Beispiel eines Titanmessers

3.2.1 Ziel der Ökobilanz

Das Ziel dieser Ökobilanz ist das Aufzeigen der Umweltwirkungen bei der Verwendung von Titan als Material für eine Messerklinge. Am Ende der Studie soll mit den vorliegenden Ergebnissen abgeschätzt werden können, ob Titan in Bezug auf Umweltaspekte überzeugen kann oder ob seine Eigenschaften so bedeutsam sind, dass selbst diese unbeachtet bleiben können. Dazu soll möglichst auch geklärt werden, ob und wann alternative Materialien in Frage kommen könnten.

Die Erstellung der Ökobilanz erfolgt auf Grundlage der Normen DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044.

3.2.2 Untersuchungsrahmen

Für eine effiziente Stoffstromanalyse muss ein Untersuchungsrahmen festgelegt werden, um die Betrachtung des Produktes einzugrenzen. Dazu erfolgt die Beschreibung des Produktes, die Definition der funktionellen Einheit, sowie die Systemabgrenzung und Festlegung der Wirkungskategorien.

Beschreibung des Messers:

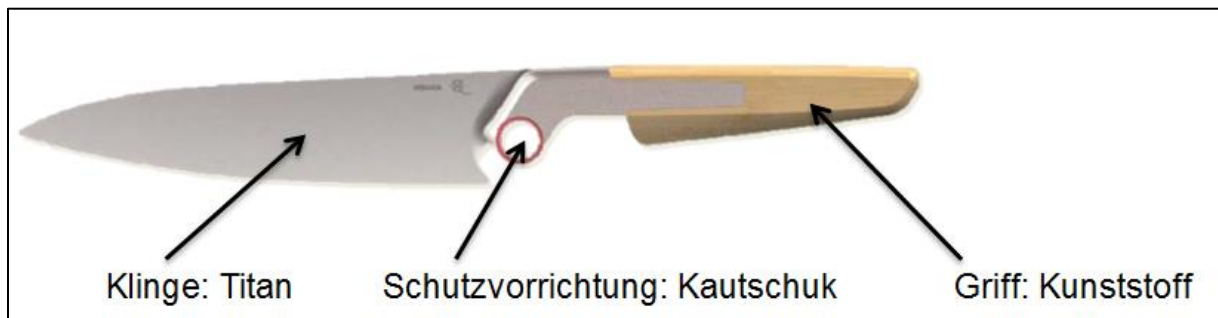


Abb.12: Darstellung des Titanmessers^[10]

Das betrachtete Messer besteht, wie in Abbildung 12 zu sehen, aus einer Klinge aus Titan, einer Schutzvorrichtung aus Kautschuk und einem Griff aus Kunststoff. Dabei sollen die jeweiligen Komponenten folgende Gewichtsanteile aufweisen:

Bestandteil	Gewicht [g]
Klinge	116,2
Schutzvorrichtung	8,4
Griff	84,6

Tab.10: Gewichtsanteile der Messerkomponenten^[10]

Funktionelle Einheit:

Die funktionelle Einheit ist die Referenzgröße, die den Nutzen des Produktsystems beziffert, d.h. es handelt sich um eine Quantifizierung. Im vorliegenden Fall wird die Herstellung eines (1) Messers betrachtet.

Systemabgrenzung:

Die Festlegung der Systemabgrenzung soll zur Übersichtlichkeit und Nachvollziehbarkeit der wichtigsten Elemente des betrachteten Produktsystems beitragen.

Das hier betrachtete System eines Titanmessers umfasst folgende Phasen (Abb.13):

- Herstellung
- Produktion
- Entsorgung

Zu allen 3 Phasen werden die jeweils verursachten Umweltwirkungen betrachtet. Ausgenommen sind dabei Umweltwirkungen durch Transportprozesse und Lagerung. Auch wird die gesamte Nutzungsphase des Produktes nicht weiter berücksichtigt, die zwischen den Prozessen Produktion und Entsorgung stattfinden würde, da die hier resultierenden Umweltwirkungen aufgrund individueller Einsatzmöglichkeiten zu stark schwanken können. Wie in Abbildung 13 zu sehen, handelt es sich bei den Inputs des Systems um Rohstoffe, Betriebsstoffe und Energie. Zu den Outputs zählen die Emissionen in Luft, Wasser und Boden.

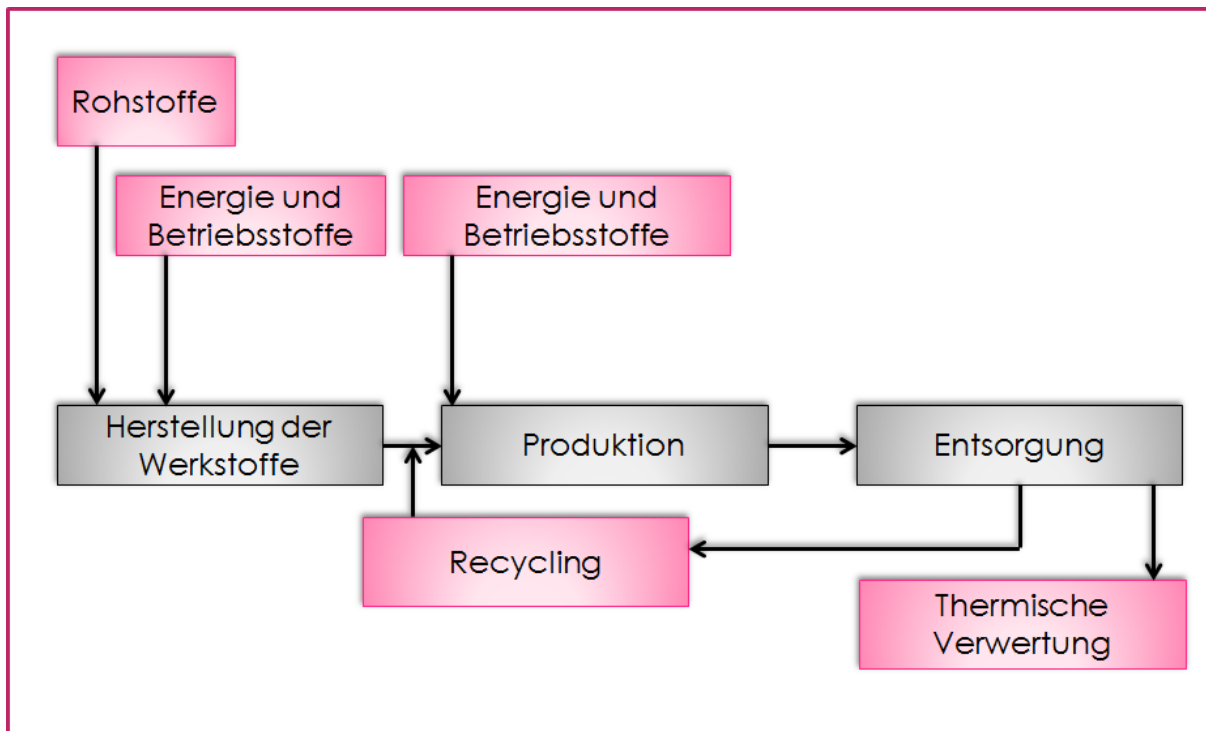


Abb.13: Systemabgrenzung bei der Betrachtung des Titanmessers

Wirkungskategorien:

Als für das Titanmesser betrachtete Wirkungskategorien wurden die Folgenden ausgewählt:

- Treibhauspotential:
Wirkung der im System freigesetzten Emissionen, die zur Temperaturerhöhung in der Atmosphäre führen (Bsp.: Methan, CO₂, etc.)
- Versauerungspotential:
Wirkung der Emissionen, welche Säuren bilden können (Sauer Regen) und damit Boden und Gewässer beeinflussen (Bsp.: Schwefeldioxid, Stickstoffoxide, etc.)
- Potential für den abiotischen Ressourcenabbau fossiler Art:
Menge abgebauter fossiler Ressourcen (Bsp.: Kohle, Erdgas, Erdöl)

Diese Kategorien geben Auskunft über die Wirkungen auf Klima, Luftqualität, Gewässerqualität und Landschaft (Flächeninanspruchnahme).

3.2.3 Sachbilanz

Die Sachbilanz dient der Quantifizierung der im System auftretenden Stoff- und Energieströme (Input, Output), umfasst aber auch die qualitative Stoffstromanalyse, bei der der Lebenszyklus mit all seinen möglichen Phasen, den das Titanmesser durchläuft, dargestellt wird. Die qualitative Stoffstromanalyse der Aufbereitung des hier thematisierten Rohstoffes Titan wurde bereits in Kapitel 2.3.3 ausführlich beschrieben und schematisch dargestellt. Auf eine konkrete Beschreibung der Rohstoffaufbereitung von Kautschuk und Kunststoff wird an dieser Stelle verzichtet. Weitere innerhalb der Systemgrenzen liegende relevante Aspekte werden in der nun erfolgenden Datenerhebung beschrieben und grafisch in einer qualitativen und quantitativen Stoffstromanalyse aufgezeigt (Abbildung 14).

Datenerhebung zum Stoffstrom:

Bei der Herstellung der Messerkomponenten handelt es sich um den Zuschnitt bzw. die Formung der einzelnen Werkstoffe, die in der darauf folgenden Produktionsphase dann zu einem kompletten Messer zusammengefügt werden können. Die Komponenten Griff und Schutzvorrichtung, d.h. Kunststoff und Kautschuk werden im Spritzgussverfahren hergestellt. Die Klinge aus Titan wird aus Metallplatten ausgestanzt.

In der Produktionsphase, also dem Zusammenfügen der Werkstoffe zu einem Messer, werden folgende Maschinen und Geräte angenommen:

- Exzenterpresse
- Fallhammer
- Förderband
- Lochstanze
- Schleifmaschine
- Schmelzofen/Ofen
- Kältekammer

In Abbildung 14 wird deutlich, dass auch die bei der Werkstoffherstellung und Produktion benötigte Energie zum Betrieb der Maschinen und Geräte berücksichtigt wird. Vermutete gängig eingesetzte Betriebsstoffe wie Propangas und flüssiger Stickstoff fließen ebenso in den Stoffstrom mit ein. Die Mengenangaben der jeweiligen Inputstoffe sind der Abbildung 14 zu entnehmen. Was den Output angeht, so kann dieser nur prozentual geschätzt werden. Gemäß der Abbildung wird also angenommen, dass 100 % des Kunststoffes thermisch verwertet wird, ebenso wie bei Kautschuk. Es wird geschätzt, dass Titan mit einer Quote von 80 % recycelt wird. Die restlichen 20 % gehen in die Deponierung oder in andere Senken ein.

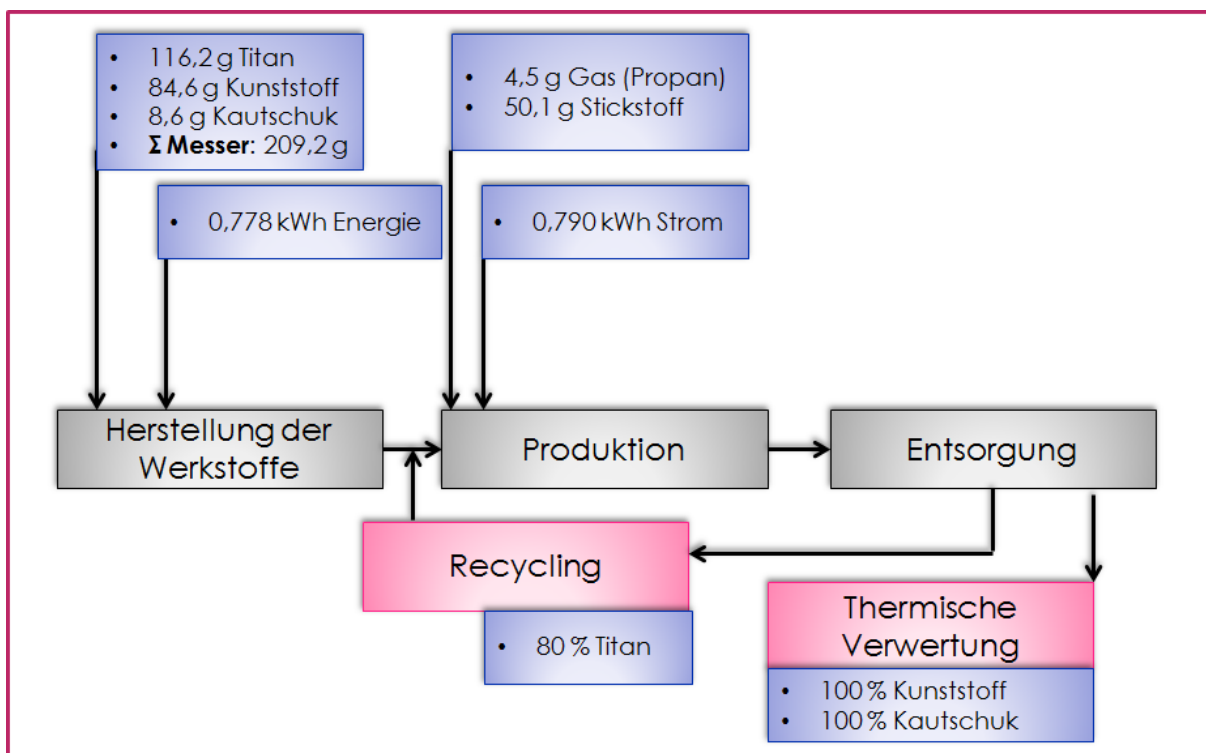


Abb.14: Quantitative und qualitative Stoffstromanalyse

3.2.4 Wirkungsabschätzung

Bei der Wirkungsabschätzung werden die Umweltwirkungen der Prozessphasen, die innerhalb der Systemgrenzen liegen, anhand der zuvor genannten Wirkungskategorien aufgezeigt.

Treibhauspotential:

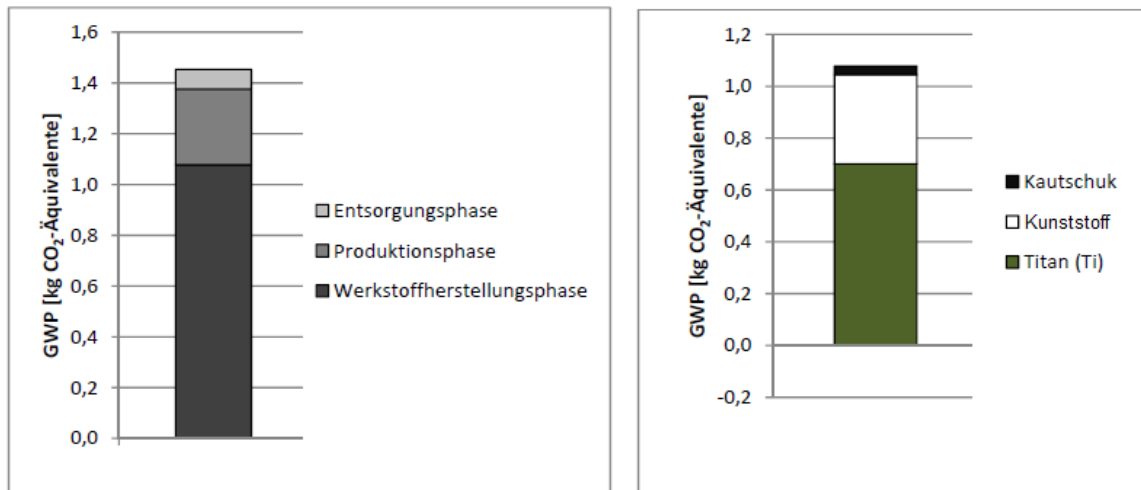


Abb.15: Treibhauspotential (links: gesamt, rechts: dominanteste Phase) ^[10]

In der linken Hälfte der Abbildung 15 sind die drei Phasen mit ihrem jeweiligen Anteil am Treibhauspotential, gemessen in kg CO₂-Äquivalente, zu sehen. Dabei hat die Werkstoffherstellungsphase mit 74 % den größten Anteil am Treibhauspotential. Der Anteil der Produktionsphase macht 21 % und der der Entsorgungsphase 5 % am Treibhauspotential aus. In der rechten Hälfte der Abbildung 15 wurde die dominanteste, also die Werkstoffherstellungsphase, nochmal in die Anteile ihrer Werkstoffkomponenten untergliedert. Es ist erkennbar, dass Titan mit 65 % den größten Anteil des Treibhauspotentials in der Werkstoffherstellungsphase verursacht. Die Herstellung von Kunststoff in dieser Phase trägt 32 % Anteil und die Kautschukherstellung sogar nur 3 % Anteil am Treibhauspotential.

Versauerungspotential:

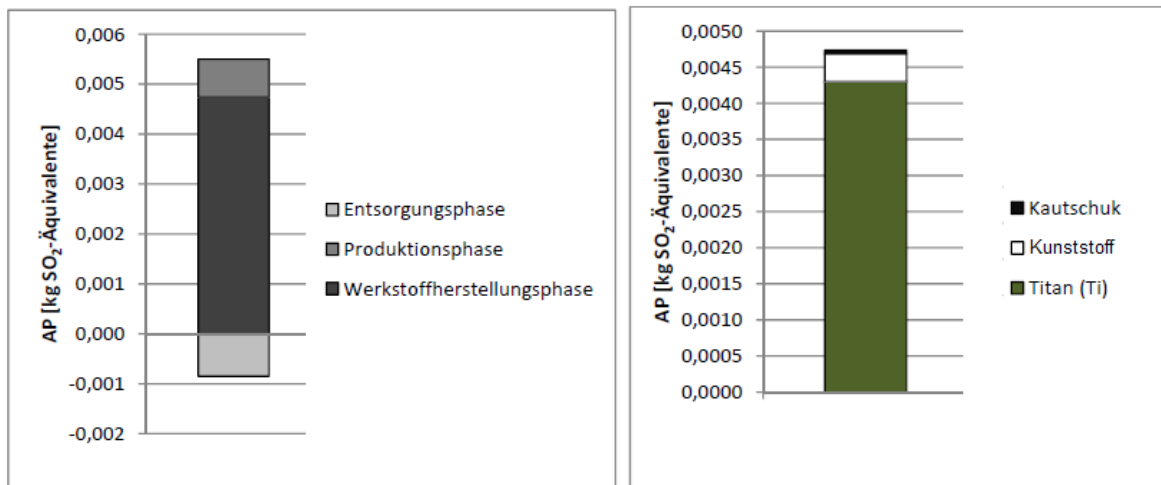


Abb.16: Versauerungspotential (links: gesamt, rechts: dominanteste Phase)^[10]

In der linken Hälfte der Abbildung 16 sind die drei Phasen mit ihrem jeweiligen Anteil am Versauerungspotential, gemessen in kg SO₂-Äquivalente, dargestellt. Dabei hat auch hier, nahezu identisch wie beim Treibhauspotential, die Werkstoffherstellungsphase mit 75 % den größten Anteil am Versauerungspotential. Die Produktion macht 12 % und die Entsorgungsphase -13 % am Versauerungspotential aus. Der negative Anteil der zuletzt genannten Phase weist in diesem Zusammenhang auf positive Umwelteffekte hin. Durch die energetische Verwertung von Kunststoff kann ein Energiegewinn erzielt werden, der sich in der Bilanzrechnung positiv bemerkbar macht.

In der rechten Hälfte der Abbildung 16 wurde die dominanteste, also erneut die Werkstoffherstellungsphase, mit ihren Werkstoffkomponentenanteilen dargestellt. Es ist zu sehen, dass Titan mit 91 % den mit Abstand größten Anteil am Versauerungspotential ausmacht. Die Herstellung von Kunststoff in der Werkstoffherstellungsphase beläuft sich auf 8 % und der Kautschukanteil auf nur 1% Anteil am Versauerungspotential.

Abiotisches Ressourcenabbaupotential:

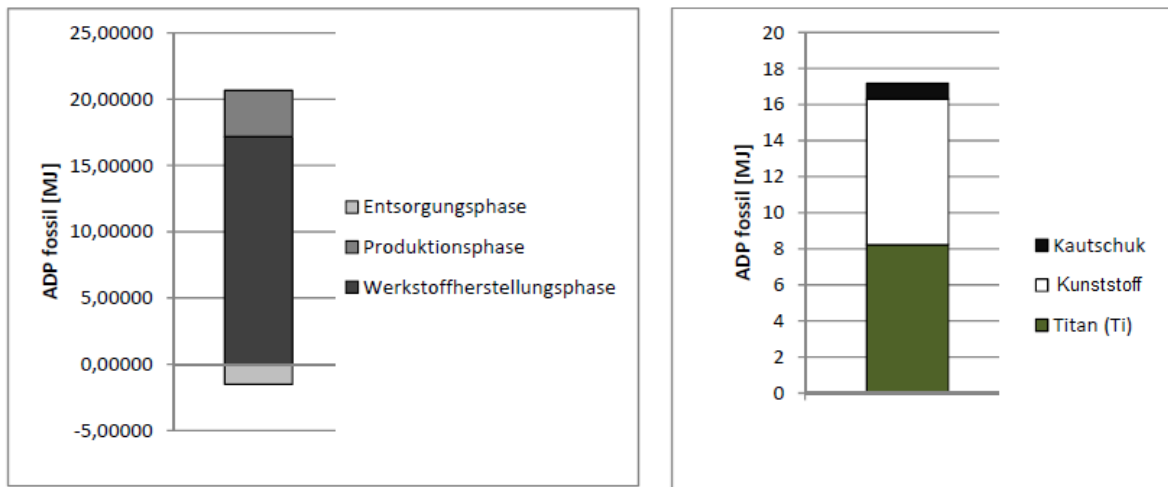


Abb.17: Abiotisches Ressourcenabbaupotential (links: gesamt, rechts: dominanteste Phase)^[10]

Die linke Seite der Abbildung 17 zeigt die drei Prozessphasen mit ihrem jeweiligen Anteil am abiotischen Ressourcenabbaupotential, gemessen in MJ. Dabei hat gleichfalls die Werkstoffherstellungsphase mit 77 % den größten Anteil am abiotischen Ressourcenabbaupotential. Die Produktion beläuft sich auf einen Anteil von 16 % und die Entsorgungsphase auf -7 % am Ressourcenabbaupotential. Abermals kommt es zu positiven Umwelteffekten durch die Entsorgungsphase. In der rechten Hälfte der Abbildung 17 ist die Werkstoffherstellungsphase zu sehen. Innerhalb dieser Phase bedingt Titan mit 48 % knapp die Hälfte des Abbaupotentials. Vergleichsweise gleichwertig zeigt sich der Anteil der Kunststoffherstellung am Abbaupotential mit ca. 47 %. Der durch Kautschuk hervorgerufene Anteil am abiotischen Ressourcenabbaupotential in der Werkstoffherstellungsphase beläuft sich auf lediglich 5 %.

3.2.5 Auswertung der Ökobilanz

Wie das vorangegangene Kapitel kenntlich macht, zeigen sich bei der Produktion eines Titanmessers besonders in der Werkstoffherstellungsphase hohe Umweltwirkungen, die dort auf den Einsatz von Titan zurückzuführen sind. Bereits in Kapitel 3.1 wurde unter allgemeinen Bedingungen darauf hingewiesen, dass die Umweltbelastungen bei der Titanproduktion sehr gravierend ausfallen können.

In Bezug auf das Messer würde sich daher als umweltschonendere Alternative der Einsatz von Edelstahl statt Titan anbieten. Ein direkter Vergleich ist in der nachfolgenden Tabelle 11 zu ersehen. Dort zeigt sich, dass die Umweltbelastungen durch Edelstahl, bezogen auf die drei betrachteten Wirkungskategorien, bis zu 60 % bis 70 % unter denen von Titan liegen.

Herstellung Werkstoffe	Titan	Edelstahl
Treibhauspotential	0,701 kg CO ₂ äq	0,257 kg CO ₂ äq
Versauerungspotential	0,0043 kg SO ₂ äq	0,00181 kg SO ₂ äq
Abbaupotential	8,23 MJ	2,75 MJ

Tab.11: Vergleich der Wirkungskategorien von Titan und Edelstahl^[10]

Ist es nicht möglich, Titan gegen ein anderes Material auszutauschen, so würde möglicherweise die Reduzierung des Klingenanteils am Messer eine Verbesserung herbeiführen können.

Fazit:

Der Einsatz von Titan ist aufgrund von sehr hohen Herstellungskosten nur in solchen Anwendungsfeldern lohnend, wo die technisch-chemischen und -physikalischen Eigenschaften von Titan überzeugend sind und nur schlecht substituiert werden können. Dazu zählt, dass Titan ein Leichtmetall bei gleichzeitig hoher Festigkeit und Härte ist. Dies ist weniger sinnvoll bei der Herstellung von Messern als dafür umso bedeutender für die Luft- und Raumfahrt, wo leichtere, aber trotzdem sehr stabile Werkstoffe eine Reduzierung des Treibstoffverbrauchs herbeiführen, was nicht nur aus langfristiger-finanzieller Sicht, sondern auch bezüglich der Minderung von Schadstoffemissionen von Vorteil ist. So konnte beispielsweise in der Flugzeugindustrie bei dem Airbus A 350 eine Gewichtseinsparung von 19 % durch den Einsatz von Titan, gegenüber der Verwendung von Stahl, erfolgen.

Das geringe Gewicht, gepaart mit der Stabilität, Langlebigkeit und der besonders guten Biokompatibilität macht das Metall auch für die Medizintechnik, in Form von beispielsweise Prothesen und Implantaten, unverzichtbar.

Die photokatalytischen Eigenschaften von Titan, d.h. die Fähigkeit andere Stoffe so zu binden, dass diese unter Licht zersetzt werden, sind sehr gefragt bei der Entwicklung schmutzabweisender Oberflächen, z.B. in der Beschichtungstechnik bzw. Pigmentindustrie. Somit bewirken derartige Titanbeschichtungen Selbstreinigungseffekte (schmutzabweisend), reduzieren die Lichtstreuung (z.B. bei Fenstern und Spiegeln), wirken biozid und beseitigen Luftverunreinigungen (z.B. Wandfarben mit Titandioxidpigmenten beeinflussen das Raumklima positiv).

Noch sind es nur die Eigenschaften, die den Einsatz von Titan vorteilhaft machen. Darüber hinaus wird aber schon seit einigen Jahren an kostengünstigeren Herstellungsprozessen für Titan geforscht, die sich im Labormaßstab bereits als erfolgsversprechend erweisen. Bislang mangelt es an der industriellen Umsetzung. Wenn dieser Schritt in der Zukunft erfolgt, so vermag die Titanproduktion in Ökobilanzierungen womöglich deutlich besser abschneiden als bisher.

4. Quellen

4.1 Literaturquellen

DIN EN ISO 14044, Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006).

DIN EN ISO 14040, Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006).

Metallische Rohstoffe, weltweite Wiedergewinnung von PGM und Materialien für Infrastrukturen, Abschlussbericht des Arbeitspaketes 2 des Projektes „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie GmbH; Wuppertal, Dezember 2011.

Titan - Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover, November 2014.

Rohstoffe für Zukunftstechnologien – Schlussbericht. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologien, Fraunhofer IRB Verlag; Stuttgart, Mai 2009.

Tisch A., Lassnig M., Gimpl H. (2012): Vergleichende Ökobilanz dreier Varianten eines Küchenmessers – Erarbeitet im Rahmen des Projektes DESIRE – Das Design der Zukunft. Klagenfurt, Österreich.

Helbig, Christoph (Oktober 2013): Titandioxid – Kritikalität der technischen Nutzung und dissipative Entsorgungspotentiale. Masterarbeit, Universität Augsburg, Institut für Physik; Augsburg.

Charlier, B., Skar, Ø., Korneliussen, A., Duchesne, J.-C., Auwera, V. J. (2007): Ilmenite composition in the Tellnes Fe–Ti deposit, SW Norway: fractional crystallization, postcumulus evolution and ilmenite–zircon relation. *Contrib Mineral Petrol* 154: 119–134

USGS: Mineral Commodity Summaries 2014. Hg. v. U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey (USGS). 2014

Buchmüller, Otto: Eine Geographie des (Nano-)Titandioxids, Universität Augsburg, Diplomarbeit, 2012

Studie: Analyse kritischer Rohstoffe für die Landesstrategie Baden-Württemberg. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik, Universität Stuttgart Institut für Siedlungswasserbau und Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Dezember 2014

4.2 Internetquellen

<http://www.ibp.fraunhofer.de/de/Kompetenzen/ganzheitliche-bilanzierung/oekobilanzierung.html>

<http://link.springer.com/article/10.1007/s00501-010-0590-7#page-2>

<https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Geologisches%20Portrait/Lagerst%C3%A4tten/Fr%C3%BChkristallisation?lang=de&language=german>

Hamann, Henny (2009): Die Titanlagerstätte Tellness, Südnorwegen. Internetlink:

http://www.geo.tu-freiberg.de/Hauptseminar/2009/Henny_Hamann.pdf

http://www.impag.de/fileadmin/resources/files/ch/Chemie/Publikationen/ChemworldStand_2012_Web.pdf

4.3 Abbildungs- und Tabellenquellen

[1] <http://de.wikipedia.org/wiki/Anatas>
<http://de.wikipedia.org/wiki/Rutil>
<http://de.wikipedia.org/wiki/Ilmenit>

[2] <https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Geologisches%20Portrait/Lagerst%E4tten/Fr%FCChkristallisation>

[3] Helbig, Christoph (Oktober 2013): Titandioxid – Kritikalität der technischen Nutzung und dissipative Entsorgungspotentiale. Masterarbeit, Universität Augsburg, Institut für Physik; Augsburg.
→ USGS: Mineral Commodity Summaries 2014. Hg. v. U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey (USGS). 2014

- [4] Studie: Analyse kritischer Rohstoffe für die Landesstrategie Baden-Württemberg. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik, Universität Stuttgart Institut für Siedlungswasserbau und Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Dezember 2014
- [5] http://www.dlr.de/DesktopDefault.aspx/tabid-3432/7418_read-11965/7418_page-8/gallery-1/gallery_read-Image.1.5150/
- <http://www.google.de/imgres?imgurl=http%3A%2F%2Fwww.silberschmuck-design-schmuck-strass-ketten-silber-uhren.de%2Fbi%2Fr%2F58%2F58285.jpg&imgrefurl=http%3A%2F%2Fwww.silberschmuck-design-schmuck-strass-ketten-silber-uhren.de%2Fringe%2F58285.htm&h=350&w=350&tbid=3l5M3dZnnWDYhM%3A&zoom=1&docid=n0gYplHcHpbJpM&ei=IAQYVaeJ8G-UvS9gPgC&tbm=isch&iact=rc&uact=3&dur=420&page=3&start=67&ndsp=41&ved=0CM8CEK0DMFs>
- <http://www.med-library.com/teilprothese-knie-kniegelenk-infos-belastbarkeit-tipps/>
- [6] Buchmüller, Otto: Eine Geographie des (Nano-)Titandioxids, Universität Augsburg, Diplomarbeit, 2012
- [7] Rohstoffe für Zukunftstechnologien – Schlussbericht, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologien, Fraunhofer IRB Verlag , Stuttgart, Mai 2009
- [8] http://www.roperld.com/science/minerals/Titanium_RecycledFit.jpg
- [9] <http://www.recyclingportal.eu/artikel/29721.shtml>
- [10] Tisch A., Lassnig M., Gimpl H. (2012): „Vergleichende Ökobilanz dreier Varianten eines Küchenmessers – Erarbeitet im Rahmen des Projektes DESIRE – Das Design der Zukunft“, Klagenfurt, Österreich

5. Abbildungsverzeichnis

Abb.1: Häufigste Titanminerale.....	3
Abb.2: Tellnes-Ilmenit-Lagerstätte.....	4
Abb.3: Ausgangs-, Zwischen- und Endprodukte bei der Titanherstellung.....	6
Abb.4: Herstellung von Titan.....	8
Abb.5: Titanprodukte. Links: Turbinenschaufel, mittig: Schmuckring, rechts: Kniegelenkprothese.....	9
Abb.6: Weltweites und US-Titan-Recycling von 1990 bis 2008.....	11
Abb.7: Weltweites und US-Titan-Recycling von 1990 bis 2200.....	12
Abb. 8: Preisentwicklung Titan.....	12
Abb.9: Stoffstrom für Titanmetall.....	13
Abb.10: Stoffstrom für Titandioxid.....	14
Abb.11: Umweltwirkungen von Titandioxid.....	16
Abb.12: Darstellung des Titanmessers.....	18
Abb.13: Systemabgrenzung bei der Betrachtung des Titanmessers.....	19
Abb.14: Quantitative und qualitative Stoffstromanalyse.....	21
Abb.15: Treibhauspotential (links: gesamt, rechts: dominanteste Phase).....	22
Abb.16: Versauerungspotential (links: gesamt, rechts: dominanteste Phase).....	23
Abb.17: Abiotisches Ressourcenabbaupotential (links: gesamt, rechts: dominanteste Phase).....	24

6. Tabellenverzeichnis

Tab.1: Länderverteilung der Produktion und Reserven von Titandioxid.....	5
Tab.2: Bewertungsskala zur Analyse der Marktkonzentration nach HHI (1 = Monopol).....	5
Tab.3: Bewertungsskala für das Länderrisiko.....	6
Tab.4: Bewertungsskala nach EPI-Umweltleistung (Environmental Performance Index).....	6
Tab.6: Anteile der Hauptanwendungsbereiche von TiO ₂	9
Tab.7: Titanbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien.....	10
Tab.8: Recyclinganteile von Titan (USGS, Stand 2006).....	11
Tab.9: Umweltbelastungen bei der Titanproduktion.....	16
Tab.10: Gewichtsanteile der Messerkomponenten.....	18
Tab.11: Vergleich der Wirkungskategorien von Titan und Edelstahl.....	25