

**Klärung der unterschiedlichen Verarbeitungseigenschaften
von Rundprofilen
aus TiAl6V**

**mit Hilfe der $\sin^2\psi$ - Eigenspannungsanalyse
in Kombination mit Methoden der zerstörenden
Werkstoffprüfung“**

Dipl. Physiking. Ingo Zahn

(Inspektionsdienstleistungen; LVQ-WP Werkstoffprüfung GmbH)

Dipl.-Phys. Daniel Krämer

(AG Prof. Dr. R. Frahm; FB C - Mathematik und Naturwissenschaften;
Bergische Universität Wuppertal)

Situation:

- Rundprofile \varnothing ca. 50 mm aus TiAl6V4 zweier unterschiedlicher Lieferanten
- Die vorherige Lieferung machte beim Drehprozess keine Schwierigkeiten.
- Die aktuelle Lieferung lässt sich schlecht verarbeiten, obwohl sich die Ergebnisse der Werksprüfzeugnisse vergleichen lassen.
- Die Spezifikationen nach WL 3.7164.1 werden von beiden Lieferungen erfüllt.

Kein Typischer Schadensfall gemäß VDI 3822

Wikipedia:

Ein **Schaden** ist ein Nachteil durch Minderung oder Verlust an materiellen oder immateriellen Gütern.

Nachteil, der infolge unerwünschter Materialeigenschaften entsteht:

Wirtschaftlicher Schaden infolge von

- Stärkerem Werkzeugverschleiß
- Höherem Arbeitsaufwand
- Ggf. Veränderung der Nutzungseigenschaften

Hypothese

- Durch unterschiedliche metallurgische Prozesse liegen nicht vergleichbare Eigenspannungszustände vor.
- Fertigungsfolgeschaden

Normen

- DIN EN ISO 13 925-1 + -2: 2003-07 (XRD Phasenanalyse)
- DIN EN ISO 15 305: 2009-01 (XRD-Stressanalyse)
- DIN EN ISO 3785: 2006-05 (Bez. Der Koordinaten im Halbzeug)

Abnahme-Regelwerke (AW)

- WL 3.7164.1

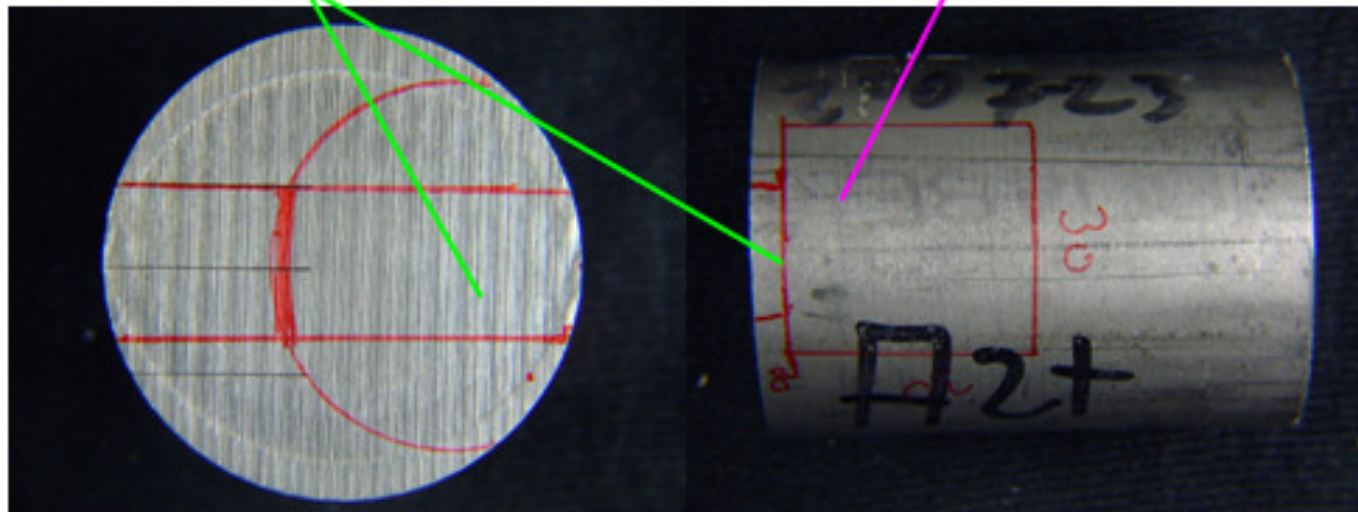
LVQ-WP

Werkstoffprüfung GmbH

Probennahme:
Sampling:

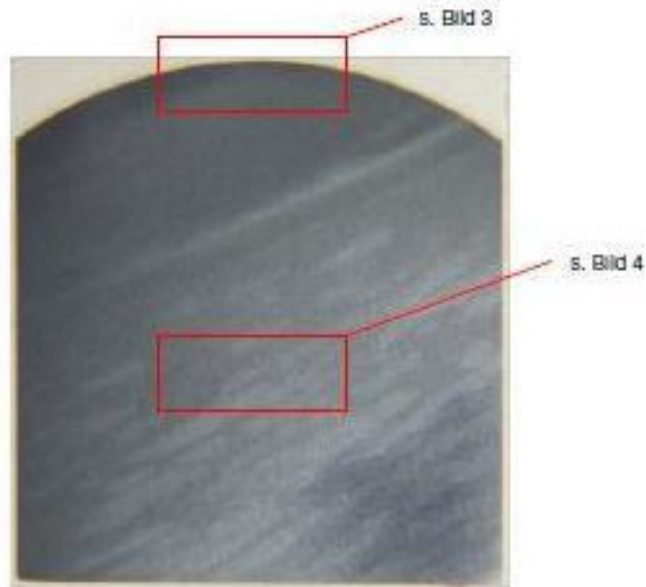
Metallogr.

XRD

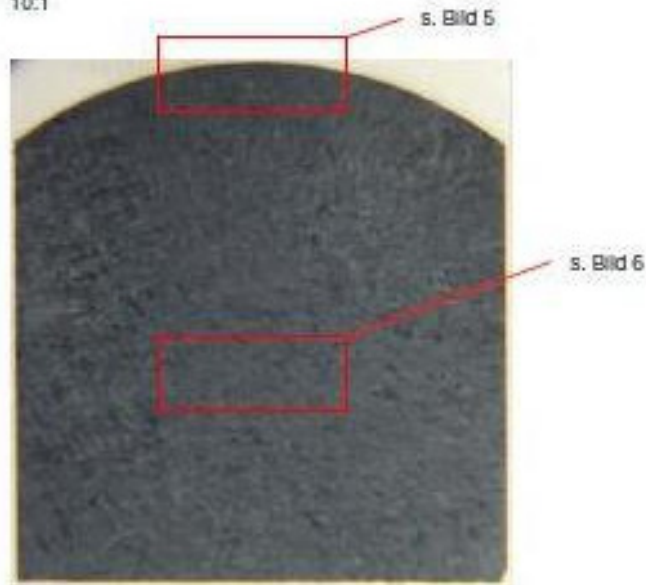


LVQ-WP-Nr.: 1164-09
Kunde:
Thema: Überprüfung der Gefügestruktur
Werkstoff: TiAl6V4

Bildanhang



10:1



10:1

Bild 1

Probe-Nr.:
1164-09-1

Charge-Nr.:

gut

Querschliff

Ätzung: Kroll

Bild 2

Probe-Nr.:

Charge-Nr.:

schlecht

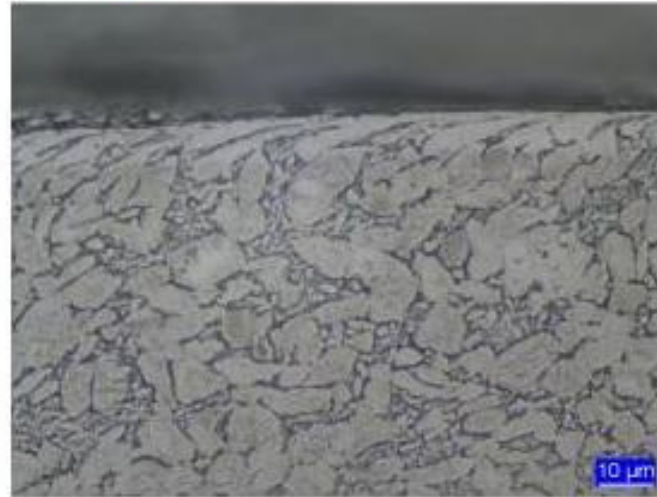
Querschliff

Ätzung:

WP
ung GmbH

LVQ-WP-Nr.: 1164-09
Kunde:
Thema: Überprüfung der Gefügestruktur
Werkstoff: TiAl6V4
Charge: gut

Bildanhang



1000:1

Bild 3

Probe-Nr.:
1164-09-1

Randgefüge

β -Phase
(dunklen Bereich
ca. 15%)

Ätzung: Kroll



1000:1

Bild 4

Probe-Nr.:
1164-09-1

Kerngefüge

β -Phase
(dunklen Bereich
ca. 10%)

Ätzung: Kroll

Mülheim, 18.12.2009

Bearbeiter: A. Lamik

LVQ-WP-Nr.: 1164-09

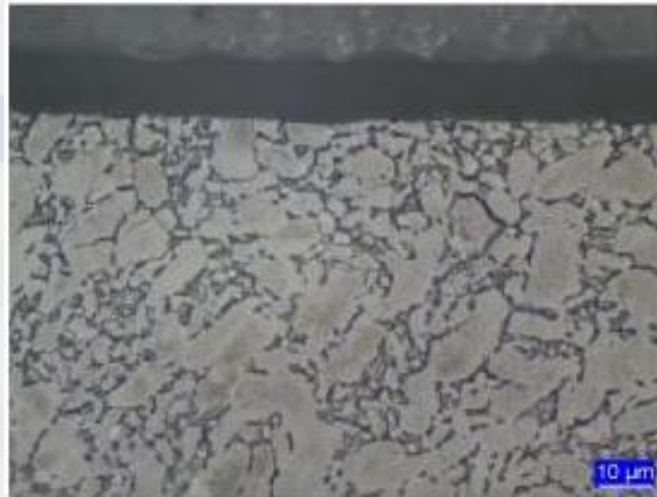
Kunde:

Thema: Überprüfung der Gefügestruktur

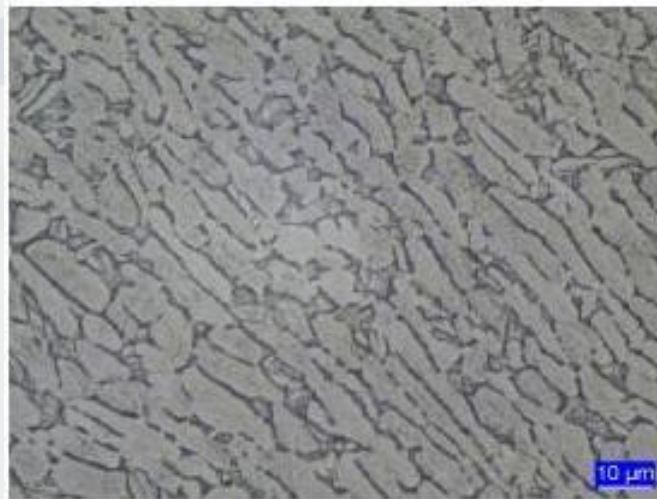
Werkstoff: TiAl6V4

Charge: **schlecht**

Bildanhang



1000:1



1000:1

Bild 5

Probe-Nr.:
1164-09-2

Randgefüge

β -Phase
(dunklen Bereiche)
ca. 16%

Ätzung: Kroll

Bild 6

Probe-Nr.:
1164-09-2

Kerngefüge

β -Phase
(dunklen Bereiche)
ca. 11%

Ätzung: Kroll

Mülheim, 18.12.2009

Bearbeiter: A. Lamik

Röntgendiffraktometrie

Aufnahmeparameter XRD-PA

• Goniometer	PW3050/60 (Theta/Theta);
• Sample stage	IR Stage (Phi, Tilt, X, Y, Z)
• Diffractometer system	XPERT-PRO
• Startposition [$^{\circ}$ Th.]	30
• Endposition [$^{\circ}$ Th.]	120
• Schrittweite [$^{\circ}$ Th.]	0,0330
• Schrittzeit [s]	118,5187
• Scan Modus	Continuous
• OED Betriebsart	Scanning
• OED Länge [$^{\circ}$ Th.]	2,12
• Art der Divergenzblende	Automatisch
• Bestrahlte Länge [mm]	10,00
• Probenlänge [mm]	10,00
• Temperatur der Messung [$^{\circ}$ C]	25,00
• Anodenmaterial	Cu
• K-Alpha1 [Å]	1,54060
• Generatoreinstellung	45 mA, 40 kV
• Goniometer Radius [mm]	240,00
• Abstand Focus-Div.blende [mm]	100,00
• Primärstrahl-Monochromator	Nein
• Probendrehung	Ja

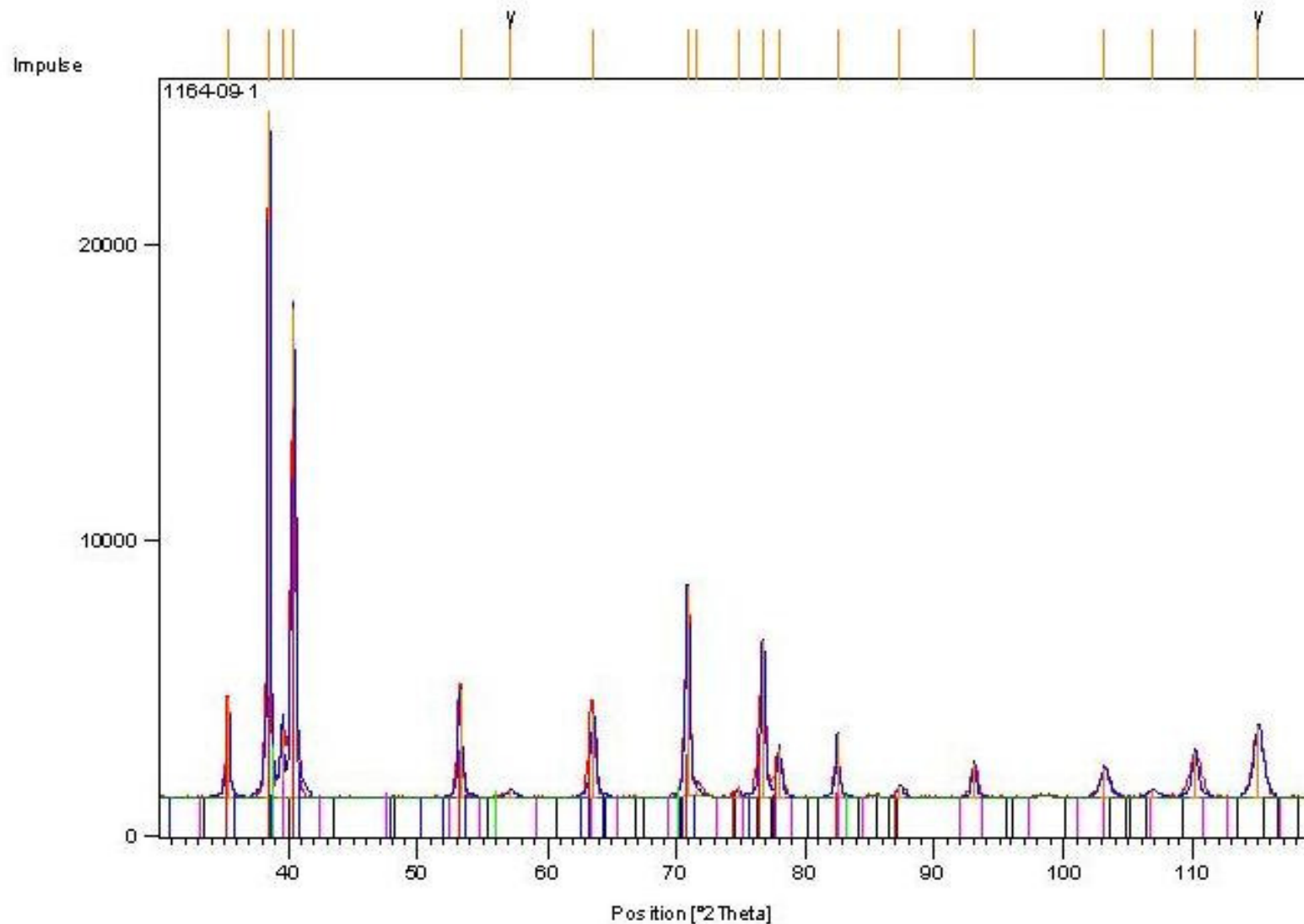
Röntgendiffraktometrische Phasenanalyse



1164/09 Anlage 1
Seite 1 von 2
17.12.2009

Bearbeiter: Dipl. Physiking. Ingo Zahn
Verfahren: Full Pattern

Diffraktogramm:



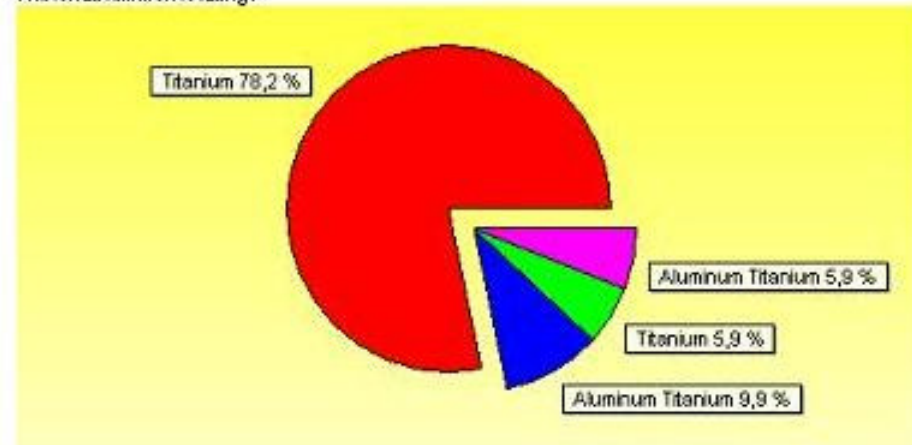
Röntgendiffraktometrische Phasenanalyse



116409 Anlage 1
Seite 2 von 2
17.12.2009

Bearbeiter: Dipl. Physiking. Ingo Zalk
Verfahren: Full Pattern

Phasenzusammensetzung:



Farbe	Score	Verbindungsname	Chemische Formel	Chemischer Name	PDF-Nr.	Raumgruppe	RIR	Halbquant (Masse-%)	Halbquant (Vol.-%)
Red	45	Titanium	Ti	α - Ti	01-089-5009	P63/mmc	6,430	78	76
Green	19	Titanium	Ti	β - Ti	01-089-4913	In-3m	9,610	6	6
Blue	14	Aluminium Titanium	Al ₂ Ti ₃	Hex.	00-052-0859	P63/mmc	4,850	10	10
Purple	10	Aluminium Titanium	AlTi	Tet. Ms	03-065-2667	I4/mmm	4,990	6	8

Referenzliste:

Pos. [2θ]	Höhe [cts]	FWHM [2θ]	d-Wert [Å]	Rel. Int. [%]	Phase [ct° 2θ]	Einstrich
35,3339	3348,75	0,2772	2,53819	13,78	1237,70	01-089-5009
38,5051	24298,68	0,2376	2,33613	100,00	7697,82	01-089-5009; 00-052-0859; 01-089-4913
39,5189	2303,94	0,2376	2,27851	9,48	729,89	03-065-2667
40,4272	16548,51	0,3664	2,22938	68,10	7863,85	01-089-5009
53,3008	3696,46	0,3664	1,71733	15,21	1756,56	01-089-5009; 00-052-0859
57,2062	210,22	0,7920	1,60902	0,87	221,99	
63,5616	2845,85	0,4752	1,46258	11,71	1803,13	01-089-5009; 00-052-0859
70,9475	1096,33	0,3960	1,32735	29,21	3746,97	01-089-5009; 00-052-0859
71,6604	244,00	0,0900	1,31588	1,00	29,28	00-052-0859
74,8851	285,76	0,3664	1,26701	1,18	135,79	03-065-2667
76,7590	5236,37	0,3960	1,24068	21,81	2797,54	01-089-5009
78,0460	1651,22	0,3664	1,22341	6,80	784,66	01-089-5009; 00-052-0859
82,5292	2138,58	0,3664	1,16794	8,80	1016,25	01-089-5009; 03-065-2667
87,3696	368,99	0,4752	1,11526	1,52	233,79	01-089-5009
93,0852	1171,83	0,3664	1,06118	4,82	566,85	03-065-2667
103,2109	1008,66	0,7920	0,98283	4,15	1065,14	03-065-2667
106,8747	206,64	0,9600	0,96903	0,85	261,85	03-065-2667
110,2031	1962,31	0,5844	0,93920	6,43	1154,86	03-065-2667
115,0802	2443,87	0,7920	0,91293	10,06	2580,72	

LVQ-WP
Werkstoffprüfung GmbH

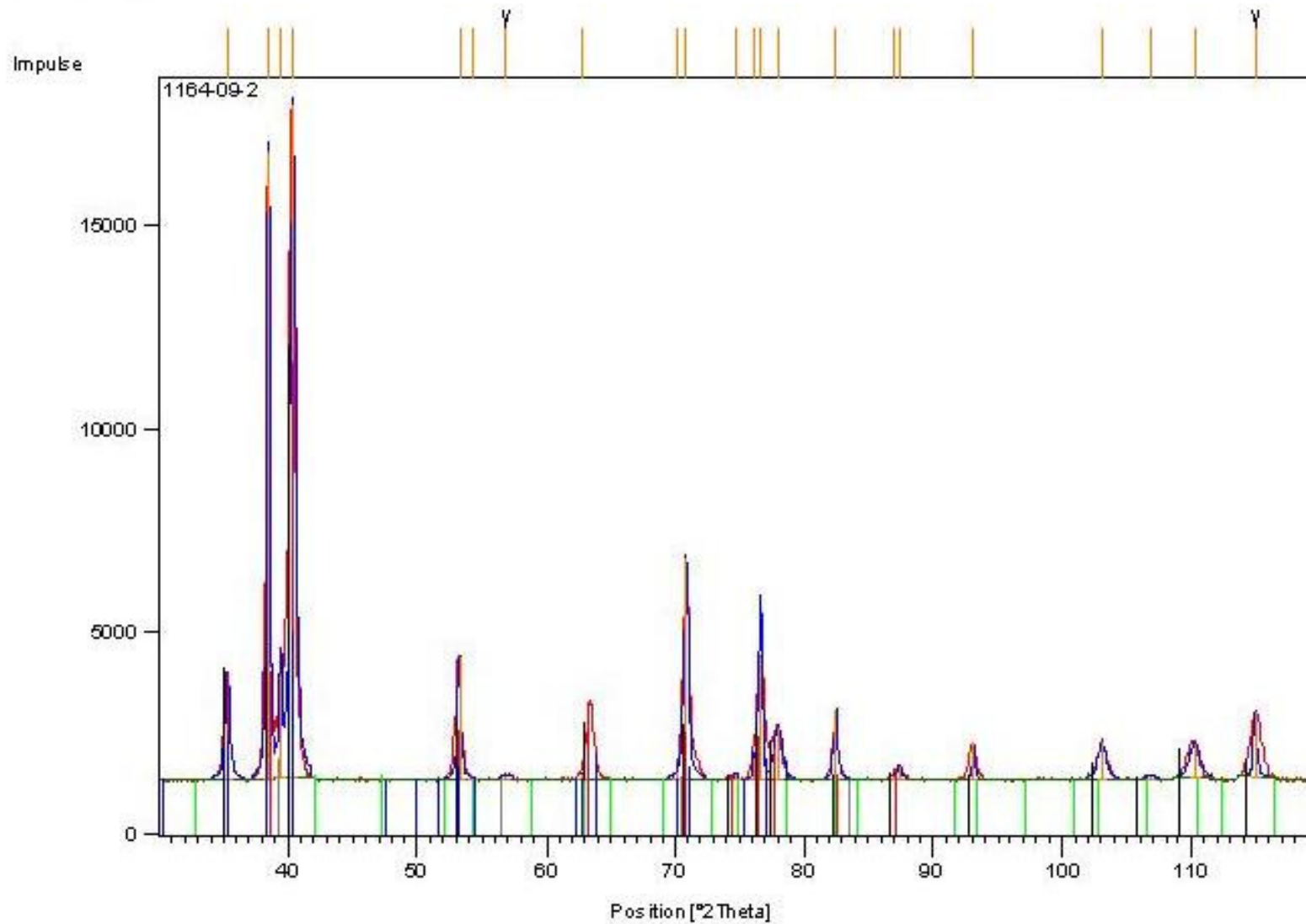
Röntgendiffraktometrische Phasenanalyse



1164/09 Anlage 2
Seite 1 von 2
17.12.2009

Bearbeiter: Dipl. Physiking. Ingo Zahn
Verfahren: Full Pattern

Diffraktogramm:



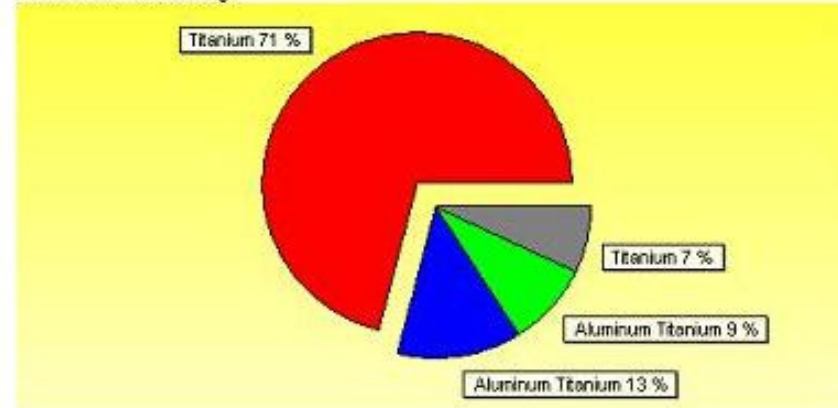
Röntgendiffraktometrische Phasenanalyse



1164/09 Anlage 2
Seite 2 von 2
17.12.2009

Bearbeiter: Dipl. Phys. Mag. Ingo Zaki
Verfahren: Full Pattern



Phasenzusammensetzung:





Farbe	Score	Verbindungsname	Chemische Formel	Chemischer Name	PDF-Nr.	Ratinggruppe	RIR	Halbquant (Masse-%)	Halbquant (Vol.-%)
Red	49	Titanium	Ti	α - Ti	01-089-5009	P63mmc	6,430	71	68
Grey	28	Titanium	Ti	β - Ti	01-089-4913	In-3m	9,610	7	7
Blue	17	Aluminium Titanium	Al ₂ Ti	Hex.	00-062-0859	P63mmc	4,850	13	13
Green	13	Aluminium Titanium	Al ₃ Ti	Tetr. Ms	03-065-0429	4/mmm	4,760	9	12

Reflexliste:

Pos. [2θ]	Höhe [cts]	FWHM [2θ]	d-Wert [Å]	Rel. Int. [%]	Fläche [cts ² ·2θ]	Erkältendruck
35,3194	2532,47	0,4356	2,53920	15,86	1528,94	01-089-5009
36,4925	15909,79	0,2712	2,33686	93,46	5732,42	01-089-5009; 00-062-0859; 01-089-4913
39,4373	2552,26	0,2376	2,28303	15,38	808,56	03-065-0429
40,4099	16894,33	0,4752	2,23030	100,00	10514,17	01-089-5009
53,2712	3008,62	0,3654	1,71821	18,13	1429,70	01-089-5009
54,3720	14,00	0,0900	1,88500	0,08	1,68	03-065-0429
56,8629	135,39	0,7920	1,61791	0,82	142,97	
62,7828	112,00	0,0900	1,47884	0,67	13,44	01-089-5009; 00-062-0859; 03-065-0429
70,1888	176,00	0,0900	1,33982	1,06	21,12	01-089-4913
70,9075	5447,78	0,4356	1,32800	32,83	3164,07	01-089-5009; 00-062-0859
74,7251	184,15	0,3950	1,28933	1,11	97,23	01-089-5009; 03-065-0429
76,1192	548,00	0,0900	1,24951	3,30	65,76	01-089-5009; 00-062-0859
76,5566	2766,92	0,2712	1,24346	16,67	1022,65	01-089-5009
76,7042	3072,91	0,1980	1,24143	18,52	811,25	01-089-5009
78,0379	1321,84	0,7128	1,22382	7,97	1295,27	00-062-0859
82,4842	1730,10	0,4356	1,16846	10,43	1004,84	01-089-5009; 03-065-0429
87,0246	112,00	0,0900	1,11879	0,67	13,44	01-089-5009
87,3859	374,42	0,3950	1,11509	2,26	197,70	01-089-5009
93,1221	945,62	0,2376	1,06086	5,70	299,57	03-065-0429
103,0816	929,30	0,7128	0,96371	5,60	883,20	03-065-0429
106,8582	110,71	0,9604	0,96913	0,67	140,29	03-065-0429
110,2729	890,00	0,9604	0,93880	5,36	1127,81	03-065-0429
114,9329	1623,33	0,3168	0,91368	9,78	685,69	

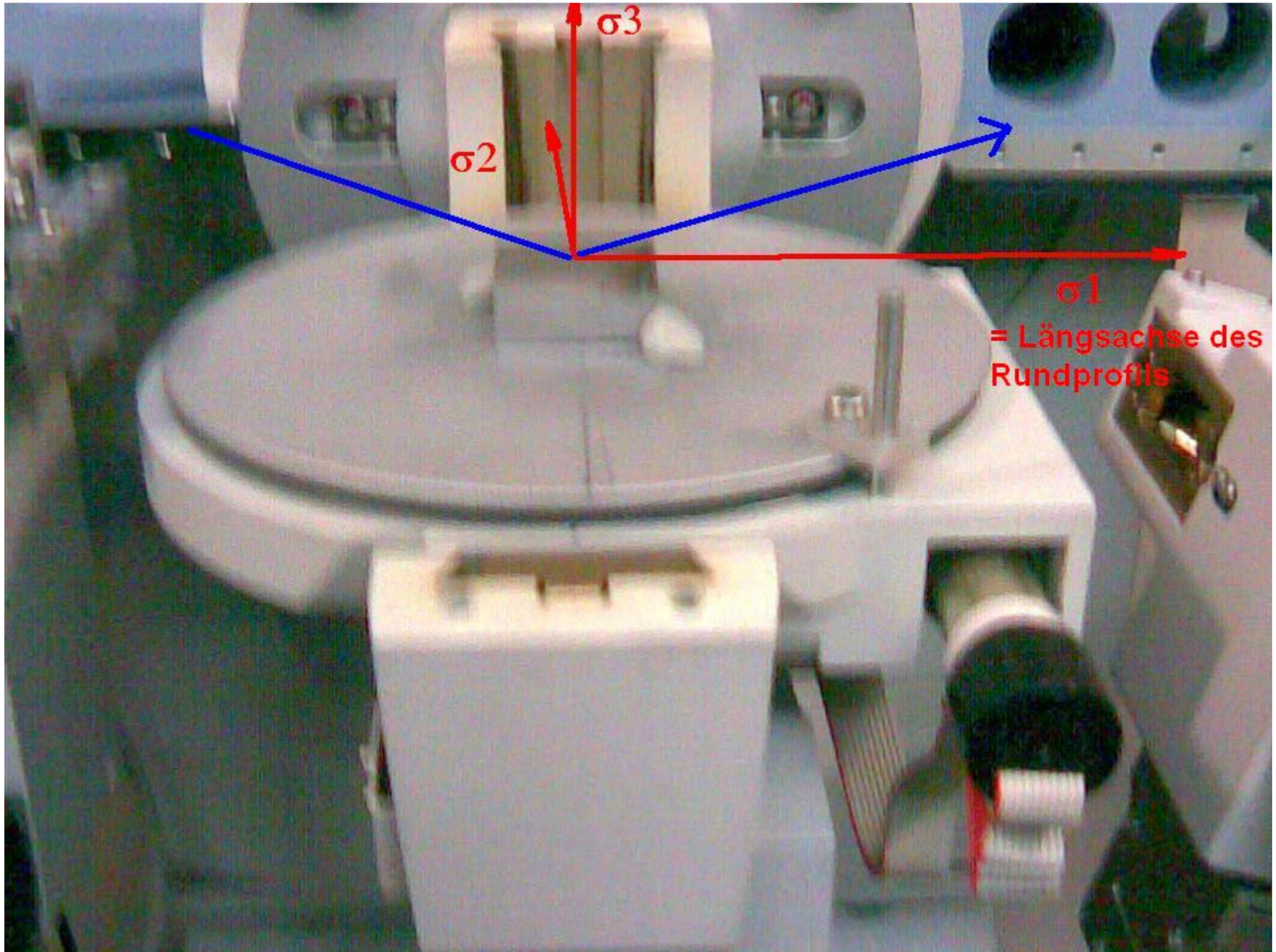
 Deutscher Akademie für Röntgen DA R-PL-2649.99		Prüfbericht-Nr. 1164/09 Report No.		 LQ-WP Werkstoffprüfung GmbH		
Auftraggeber Customer		Seite 1 von 2 Page from				
Auftrags-Nr. (Kunde) Order no.	---	Auftrags-Nr. (LVQ-WP) Order no.	3 091214 1164			
Prüfobjekt Object	Titan Stäbe	Anzahl der Proben Number of Item	2			
Abmessungen Dimension	∅ 50 mm	Werkstoff Material	Titan A16V4 GR.5			
Chargen-Nr. Charge no.		Wärmebehandlung Heat treatment	geglüht			
Prüftechnik Testing equipment	Auflichtmikroskop: Leica DM 4000M Serien-Nr.: 314121	Auflichtmikroskop: Olympus BX 51 Serien-Nr.: 6J18899				
Gegenstand der Untersuchung						
Überprüfung der Werkstoffeigenschaften und der Gefügestruktur.						
Metallographischer Untersuchung (siehe Bildanhang)						
Beschreibung des Metallographische Befundes						
Probe-Nr.:	Charge-Nr.:	Bereich	Anteil β-Phase	Streckungsgrad * (L:B)	Bemerkungen	Siehe Bild
1164/09-1	gut	Gesamt	---	---	Texturrichtung quer zur Längsachse	1
1164/09-2	schlecht	Gesamt	---	---	Texturrichtung parallel zur Längsachse	2
1164/09-1	gut	Rand	ca. 16%	---	Stark verformte Oberfläche	3
1164/09-2	schlecht	Rand	ca. 16%	---	Kaum verformte Oberfläche	5
1164/09-1	gut	Kern	ca. 10%	von 1 bis 2	--	4
1164/09-2	schlecht	Kern	ca. 11%	von 1 bis 10	--	6
* Verhältnis maximale Länge (L) zu maximale Breite (B) des Kornes						
Bemerkungen Remarks						
Prüfort Place Prüfdatum Date	Mülheim/Ruhr 18.12.2009	Prüfbericht akzeptiert Test report accepted	Dipl.-Ing. M. Krämer Prüfsachverständiger	A. Lamik Prüfer		

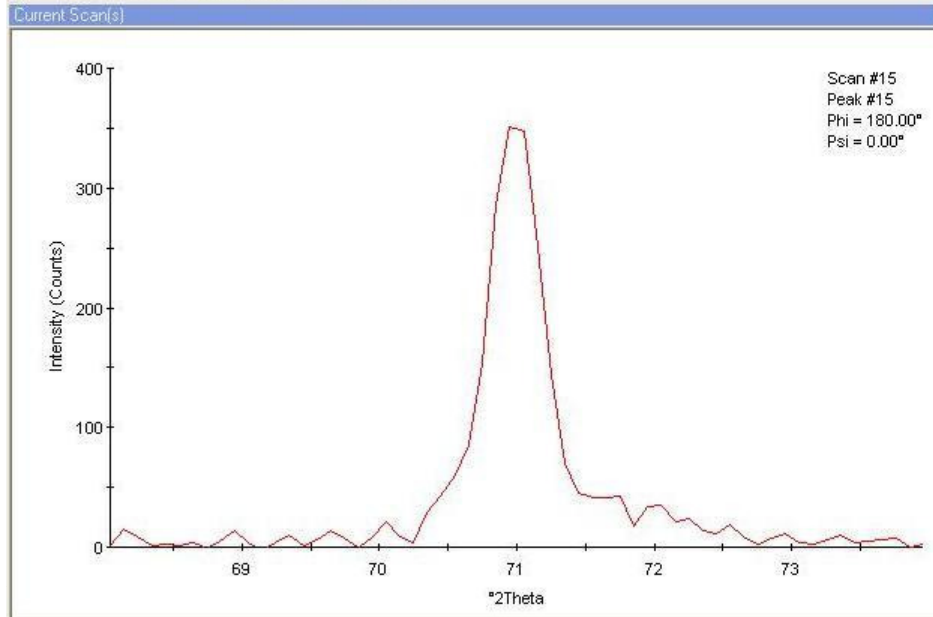
 Deutscher Akademie für Röntgen DAP-IS-4035.99		Prüfbericht-Nr. 1164/09 Report No.		 LQ-WP Werkstoffprüfung GmbH			
Auftraggeber Customer		Seite 2 von 2 Page from					
Auftrags-Nr. (Kunde) Order no.	---	Auftrags-Nr. (LVQ-WP) Order no.	3 091214 1164				
Prüfobjekt Object	Titan Stäbe	Anzahl der Proben Number of Item	2				
Abmessungen Dimension	∅ 50 mm	Werkstoff Material	Titan 6Al4V GR.5				
Chargen-Nr. Charge no.		Wärmebehandlung Heat treatment	geglüht				
Prüftechnik Testing equipment	Modell: Panalytical X'Pert MPD Pro Serien Nr.: 1731	Ausw.sofw. X'Pert HighScore Plus Ref.daten.: ICDD PDF-2 (2002) Sets 1-52					
Röntgendiffraktometrische Phasenanalyse [Gew.%] Auswertung mit der „Full Pattern“ Methode – Standardlös							
		Chemische Formel	Ti	Al₂Ti	Ti	Al₂xTi_{1-x}	Auswertung
Probe-Nr.:	Charge-Nr.:	Phase	Titanium α-Ti	Aluminium Titanium (Teil: Mol)	Titanium β-Ti	Aluminium Titanium (Gew.)	siehe Anlage
1164/09-1	gut		78	6	6	10	1
1164/09-2	schlecht		71	9	7	13	2
Bemerkungen Remarks							
Prüfort Place Prüfdatum Date	Mülheim/Ruhr 18.12.2009	Prüfbericht akzeptiert Test report accepted	Dr.-Ing. K. Schiebold Prüfsachverständiger	Dipl. Physiking. I. Zahn Prüfer			

Aufnahmeparameter XRD-RSA

- Anodenmaterial Cu
- K-Alpha1 [\AA] 1,54060
- Blenden $0,5^\circ / 1^\circ / 0,5^\circ$
- Zähldauer 59,690 s
- Messbereich 2Θ $68 - 74^\circ$ ($\{103\} \alpha\text{-Ti} = 70,769^\circ$)
- $\varphi = 0, 45, 90^\circ$
- $\sin^2(\Psi) = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6$ (jeweils in + und -)

LVQ-WP
Werkstoffprüfung GmbH





Analysis Parameters

Method: Unidirectional stress analysis

Material: Ti

s1 -2.56 1/TPa
1/2 s2 10.83 1/TPa

Database... No Material

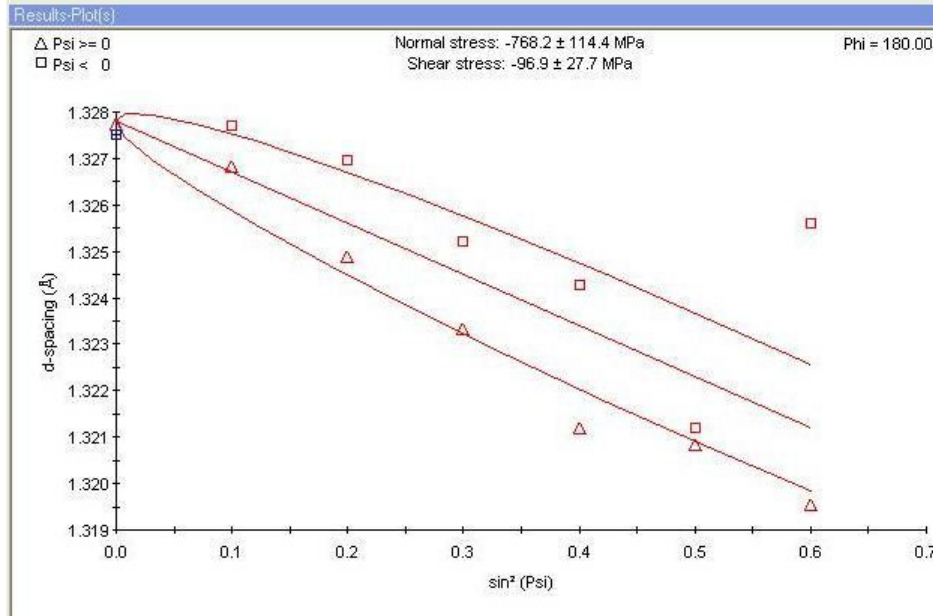
Stress State Options: Uniaxial, Equi-biaxial, Biaxial

Lattice Refinement: Orientation angle, Shear stresses, Hydrostatic stress

Strain-free d-spacing (Å): 1.32339
Strain free $\sin^2(\Psi)$: 0.400

Analysis Parameters Checklist:

- Divergence Slit
- Absorption/Transparency
- Background
- Lorentz-Polarisation
- K-Alpha2-Stripping
- Misalignment Correction

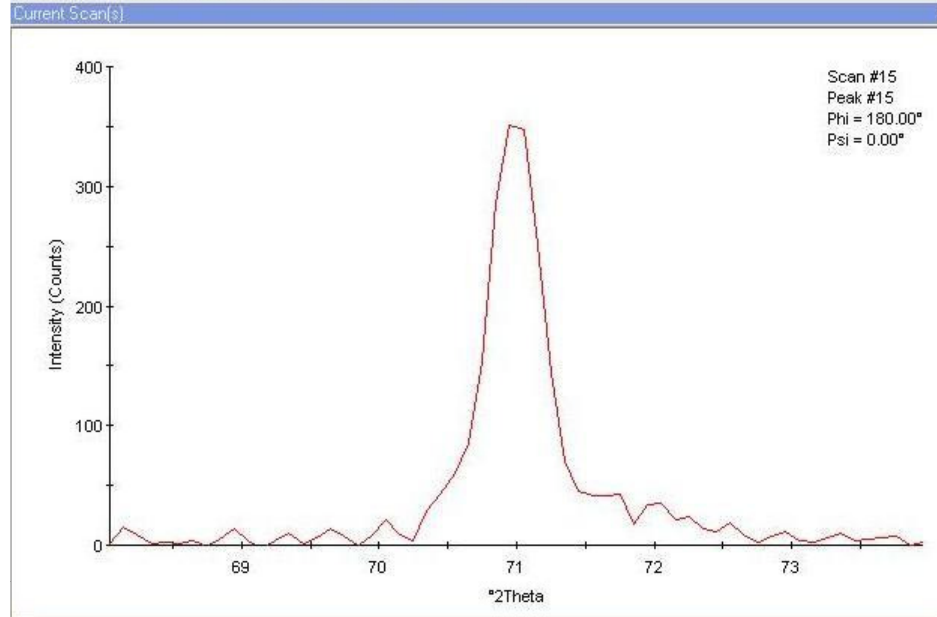


Stress Results

Stresses in the specimen reference frame

Phi [°]	SigmaPhi [MPa]	StdDev [MPa]	TauPhi [MPa]	StdDev [MPa]	Sig11+Sig22 [MPa]	StdDev [MPa]
0.00	-768.2	114.4	-96.9	27.7	-1298.6	174.3
90.00	-1681.4	162.1	-128.7	39.3	-1446.2	247.0
135.00	-690.3	156.0	0.7	37.8	-1212.2	237.7

gut Phi = 45°



Analysis Parameters

Method: Unidirectional stress analysis

Material: Ti

s1 -2.56 1/TPa
1/2 s2 10.83 1/TPa

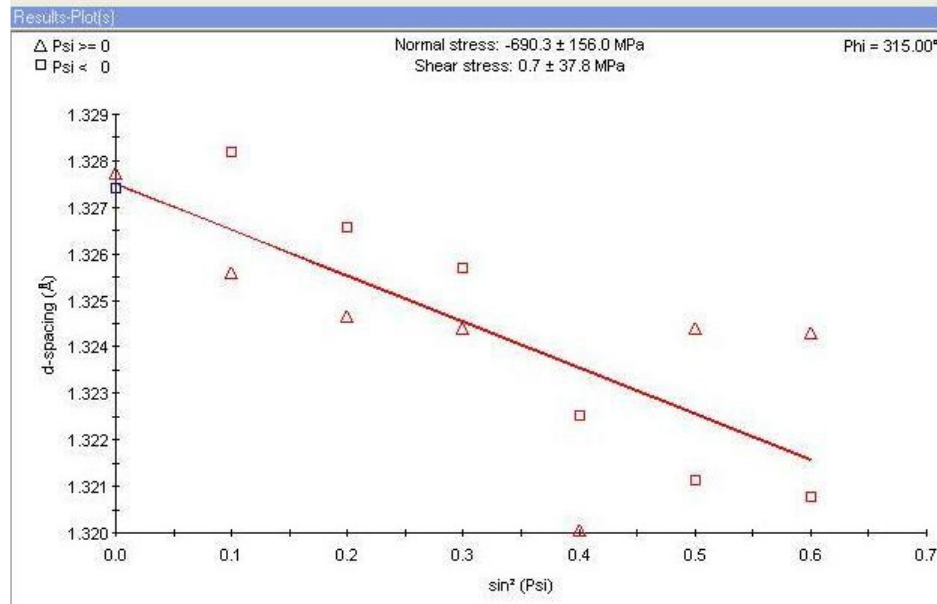
Database... No Material

Stress State Options: Uniaxial, Equi-biaxial, Biaxial

Lattice Refinement: Orientation angle, Shear stresses, Hydrostatic stress

Strain-free d-spacing (Å): 1.32339
Strain free sir²(Psi): 0.400

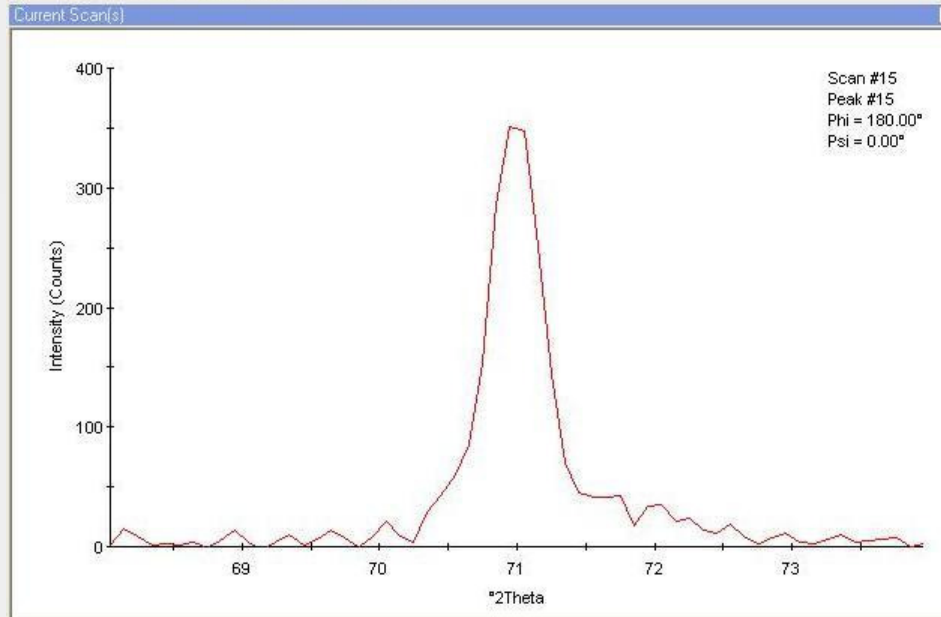
Analysis



Stress Results

Stresses in the specimen reference frame

Phi (°)	SigmaPhi (MPa)	StdDev (MPa)	TauPhi (MPa)	StdDev (MPa)	Sig11+Sig22 (MPa)	StdDev (MPa)
0.00	-768.2	114.4	-96.9	27.7	-1298.6	174.3
90.00	-1681.4	162.1	-128.7	39.3	-1446.2	247.0
135.00	-690.3	156.0	0.7	37.8	-1212.2	237.7



Analysis Parameters

Method: Unidirectional stress analysis

Material: Ti

s1 -2.56 1/TPa
1/2 s2 10.83 1/TPa

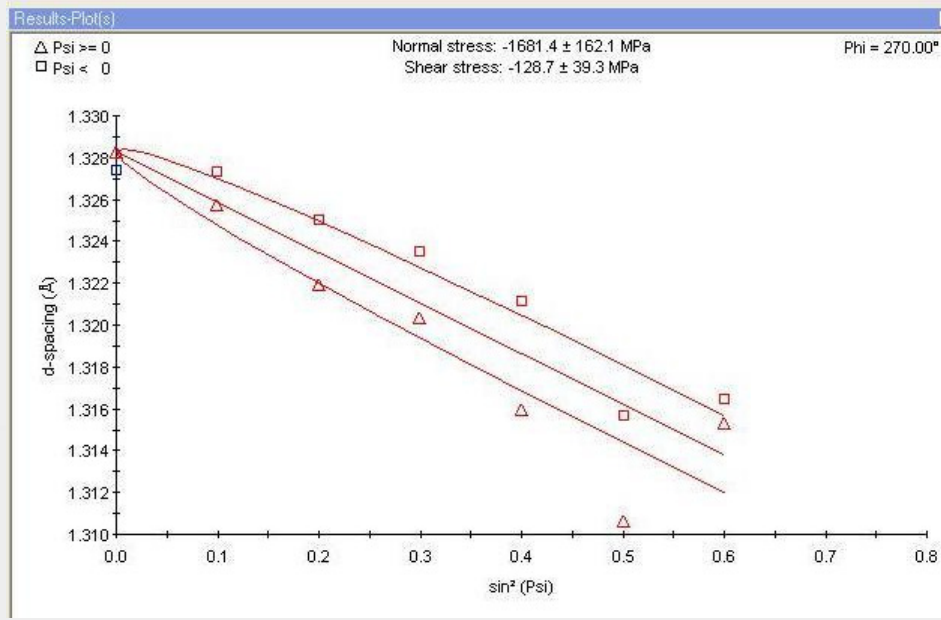
Database... No Material

Stress State Options: Uniaxial, Equi-biaxial, Biaxial

Lattice Refinement: Orientation angle, Shear stresses, Hydrostatic stress

Strain-free d-spacing (Å): 1.32339
Strain free $\sin^2(\Psi)$: 0.400

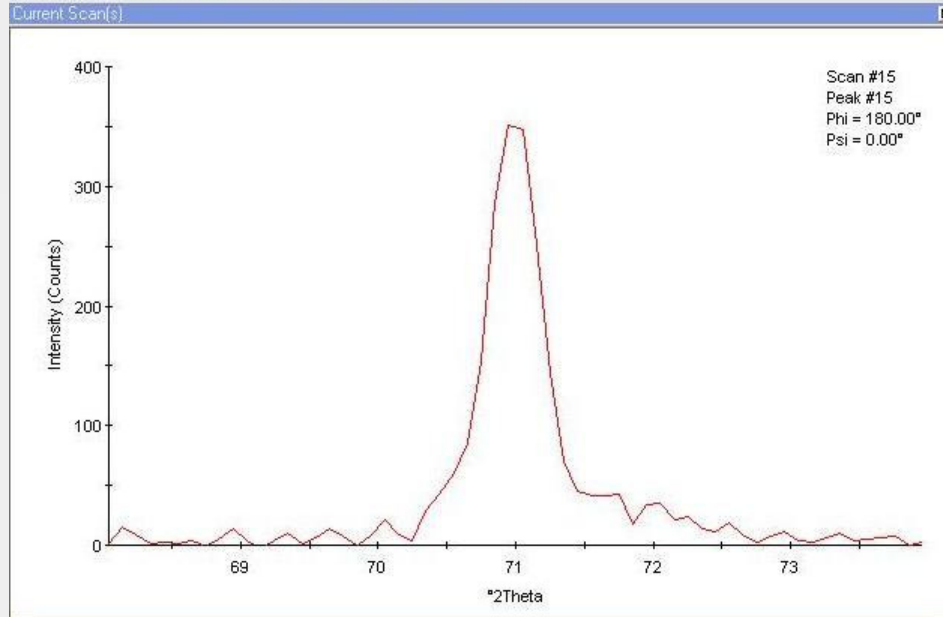
Analysis



Stress Results

Stresses in the specimen reference frame

Phi [°]	SigmaPhi [MPa]	StdDev [MPa]	TauPhi [MPa]	StdDev [MPa]	Sig11+Sig22 [MPa]	StdDev [MPa]
0.00	-768.2	114.4	-96.9	27.7	-1298.6	174.3
90.00	-1681.4	162.1	-128.7	39.3	-1446.2	247.0
135.00	-690.3	156.0	0.7	37.8	-1212.2	237.7



Analysis Parameters

Peak Search

Indexing & Peak Labeling

Sectioning & Select Range

Divergence Slit

Absorption/Transparency

Background

Lorentz-Polarisation

K-Alpha2-Stripping

Peak Position

Misalignment Correction

Analysis

Method: Unidirectional stress analysis

Material: Ti

s1 -2.56 1/TPa

1/2 s2 10.83 1/TPa

Database... No Material

Stress State Options

Uniaxial

Equi-biaxial

Biaxial

Lattice Refinement

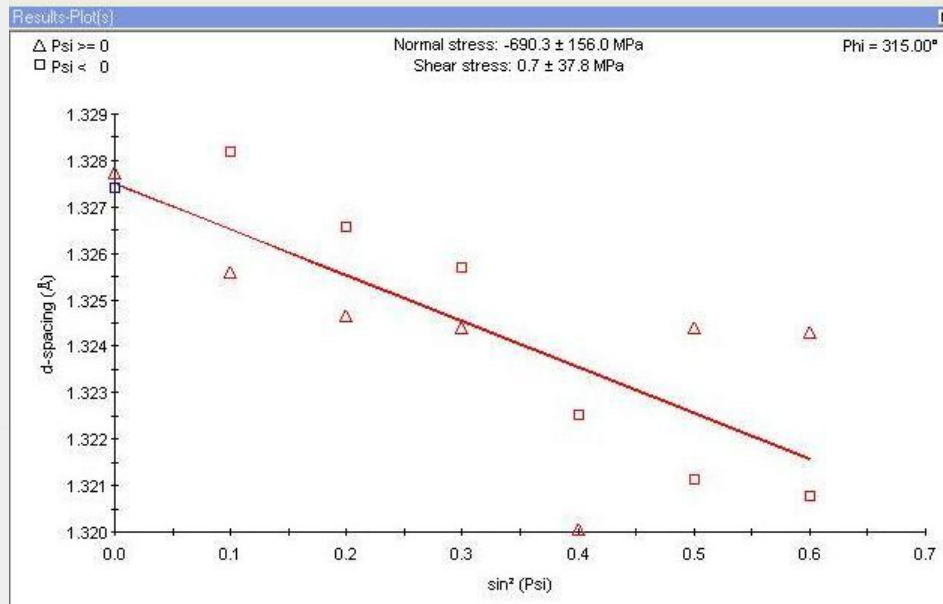
Orientation angle

Shear stresses

Hydrostatic stress

Strain-free d-spacing (Å): 1.32339

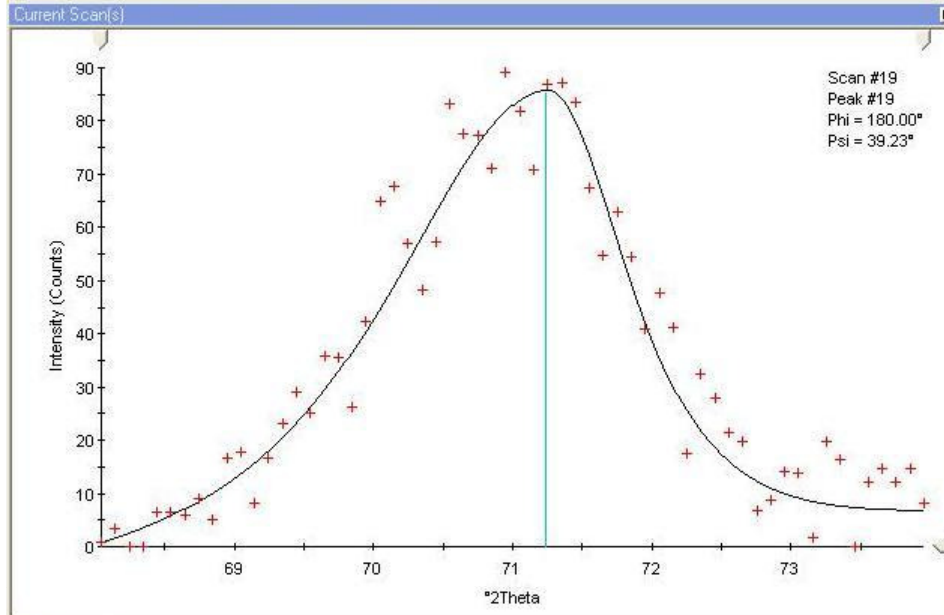
Strain free sin²(Psi): 0.400



Stress Results

Stresses in the specimen reference frame

Phi (°)	SigmaPhi (MPa)	StdDev (MPa)	TauPhi (MPa)	StdDev (MPa)	Sig11+Sig22 (MPa)	StdDev (MPa)
0.00	-768.2	114.4	-96.9	27.7	-1298.6	174.3
90.00	-1681.4	162.1	-128.7	39.3	-1446.2	247.0
135.00	-690.3	156.0	0.7	37.8	-1212.2	237.7



Analysis Parameters

Peak Search

Indexing & Peak Labeling

Sectioning & Select Range

Divergence Split

Absorption/Transparency

Background

Lorentz-Polarisation

K-Alpha2-Stripping

Peak Position

Misalignment Correction

Analysis

Fitting method: Profile shape function

Pearson VII

Range (*2Theta): 68.04 73.96

Threshold (%) 0

K-Alpha2 Peak

Background Level

Background Slope

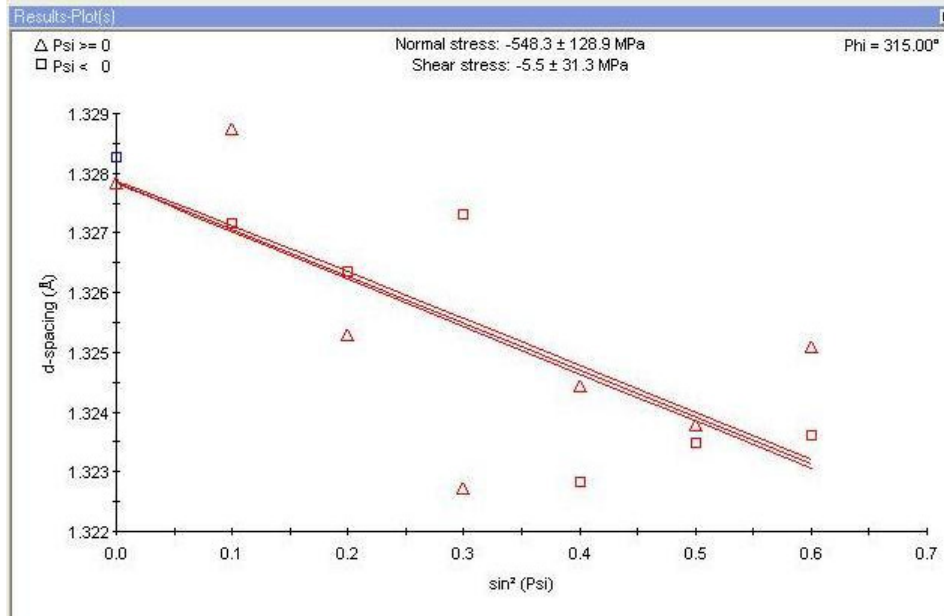
Asymmetry

Shape parameter m 2.00

Fit OK, R-value = 2.50E+1

Apply to

All scans

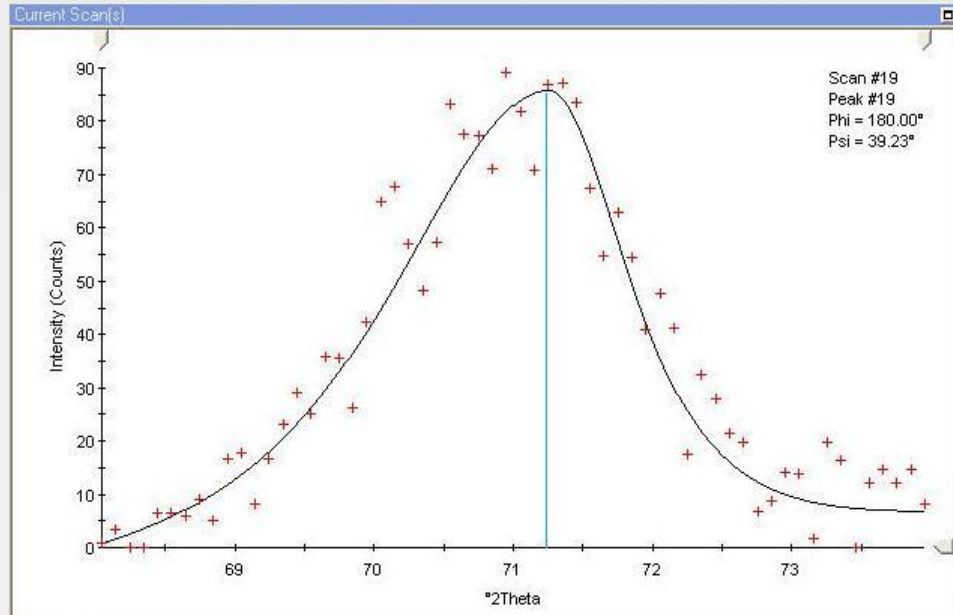


Stress Results

Stresses in the specimen reference frame

Phi (°)	SigmaPhi (MPa)	StdDev (MPa)	TauPhi (MPa)	StdDev (MPa)	Sig11+Sig22 (MPa)	StdDev (MPa)
0.00	-930.1	95.9	-46.7	23.3	-1572.2	146.1
90.00	-1311.4	203.2	16.2	49.3	-1640.6	309.6
135.00	-548.3	128.9	-5.5	31.3	-1402.5	196.4

schlecht Phi = 90°



Analysis Parameters

Peak Search

Indexing & Peak Labeling

Sectioning & Select Range

Divergence Slit

Absorption/Transparency

Background

Lorentz-Polarisation

K-Alpha2-Stripping

Peak Position

Misalignment Correction

Analysis

Fitting method:
Profile shape function
Pearson VII

Range (*2Theta): 68.04 73.96

Threshold (%) 0

K-Alpha2 Peak

Background Level

Background Slope

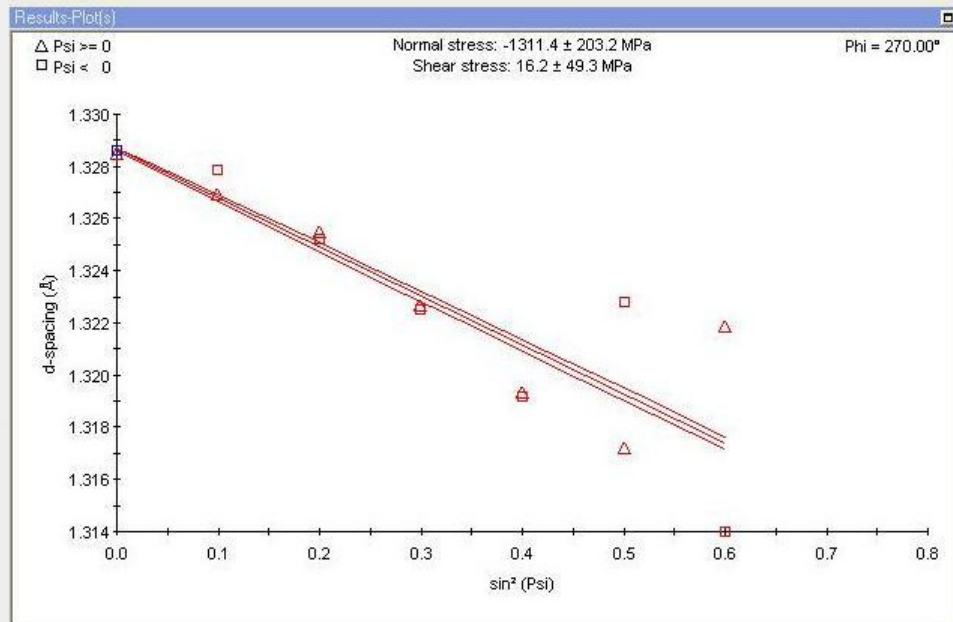
Asymmetry

Shape parameter m 2.00

Fit OK, R-value = 2.50E+1

Apply to

All scans



Stress Results

Stresses in the specimen reference frame

Phi (°)	SigmaPhi (MPa)	StdDev (MPa)	TauPhi (MPa)	StdDev (MPa)	Sig11+Sig22 (MPa)	StdDev (MPa)
0.00	-930.1	95.9	-46.7	23.3	-1572.2	146.1
90.00	-1311.4	203.2	16.2	49.3	-1640.6	309.6
135.00	-548.3	128.9	-5.5	31.3	-1402.5	196.4

röntgendiffraktometrische Eigenspannungsanalyse sin²Ψ - Methode

Gerät: Panalytical X'Pert MPD Pro

Serien Nr.: 1731

Proben - Nr.	Bemerkungen	Eigenspannung σ							Vergleichsspannungen ¹				
		φ = 0° tangential		φ = 45°		φ = 90° radial		σ _Z [MPa]	Rotation φ' [°]	τ ⁰ [MPa]	σ _{VM} ² [MPa]	σ _{Tr} ³ [MPa]	σ _H ⁴ [MPa]
		σ _{φ=0} = σ _x = σ ₁₁ = σ ₁ [MPa]	τ _{φ=0} [MPa]	σ _{φ=45°} [MPa]	τ _{φ=45°} [MPa]	σ _{φ=90°} = σ _y = σ ₂₂ = σ ₂ [MPa]	τ _{φ=90°} [MPa]						
		Richtung X				Richtung Y							
1164-09-1		-1681,0 ± 162,0	-129 ± 39	-690 ± 156	1 ± 38	-768 ± 114	-97 ± 28	534,5 ± 18,0	-24,8 ± 1,2	-466,5	1658,2	1291,2	836,8
1164-09-2		-1312,0 ± 203,0	16 ± 49	-647 ± 129	-6 ± 31	-929 ± 96	-47 ± 23	573,5 ± 20,5	-35,8 ± 2,7	-191,5	1214,7	641,8	532,1
		±	±	±	±	±	±	±	±				
		±	±	±	±	±	±	±	±				
		±	±	±	±	±	±	±	±				

¹ gilt für die Vergleichssp. im ebenen Spannungszustand:

$$\sigma_{\text{VM}} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2 + 3\tau^2}$$

$$\sigma_{\text{Tr}} = \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 4\tau^2}$$

Für die Hauptnormalspannungshypothese gilt:

$$\sigma_{\text{H}} = \frac{1}{2} \left[(\sigma_1 + \sigma_2) + \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 4\tau^2} \right]$$

Berechnungsformeln:

$$\sigma_{11} = 0,5 * (\sigma_{11} + \sigma_{22}) + \sigma_{\varphi=45^\circ} \quad (42) \text{ umgestellt}$$

$$\varphi' = \frac{1}{2} * \arctan \left(\frac{2\tau_{12}}{\sigma_{11} - \sigma_{22}} \right) \quad (46)$$

$$\tau^0 = 0,5 * (\sigma_{11} - \sigma_{22})$$

B. Eigenmann, E. Mächerauch:

"Röntgenographische Untersuchung von Spannungszuständen in Werkstoffen" Teil I, Matwiss. Und werkstofftechnik Heft 3/1995, S. 148-160

siehe auch: <http://de.wikipedia.org/wiki/Eigenspannung>

Untersuchungen - Ergebnisübersicht

Röntgendiffraktometrische Phasenanalyse

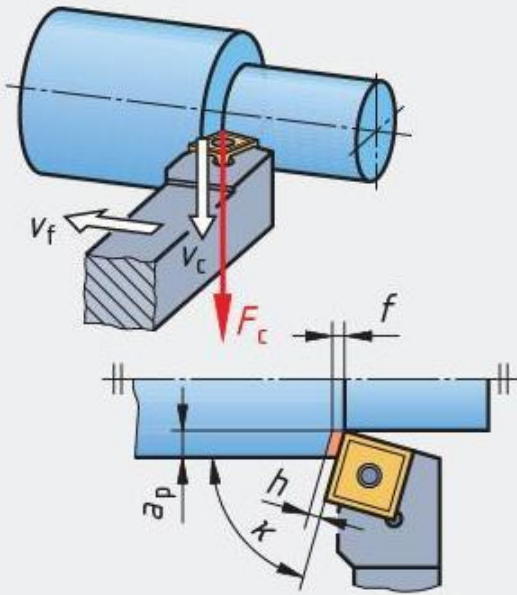
- Auf der Drehoberfläche ließen kaum signifikante Unterschiede in der Phasenzusammensetzung beider Proben erkennen.

Röntgendiffraktometrische Eigenspannungsanalyse

- bei der guten Probe lag ein deutlich höheres Eigenspannungsniveau in Druckrichtung vor als bei der schlechten.

Metallographischer Befund

- Die Halbzeuge stammen aus unterschiedlichen metallurgischen Prozessen.



- F_c Schnittkraft in N
- A Spanungsquerschnitt in mm^2
- a_p Schnitttiefe in mm
- f Vorschub je Umdrehung in mm
- h Spanungsdicke in mm
- α Einstellwinkel in Grad ($^\circ$)
- C Korrekturfaktor für die Schnittgeschwindigkeit
- v_c Schnittgeschwindigkeit in m/min
- k_c spezifische Schnittkraft in N/mm^2 (Seite 299)
- P_c Schnittleistung in kW
- P_1 Antriebsleistung der Maschine in kW
- η Wirkungsgrad der Maschine

Korrekturfaktor C für die Schnittgeschwindigkeit	
Schnittgeschwindigkeit v_c in m/min	C
10... 30	1,3
31... 80	1,1
81...400	1,0

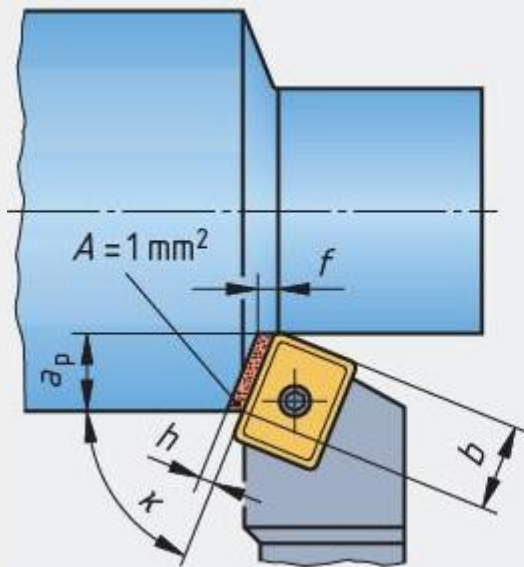
Spanungsquerschnitt

$$A = a_p \cdot f$$

Schnittkraft

$$F_c = A \cdot k_c \cdot C$$

Aus: Tabellenbuch Digital, Europaverlag Haan- Gruiten



Die spezifische Schnittkraft k_c wird benötigt, um einen Span mit dem Spanungsquerschnitt $A = 1 \text{ mm}^2$ vom Werkstück zu trennen. Die Werte werden in Drehversuchen ermittelt. Sie bilden die Grundlage zur Berechnung der Schnittkräfte und der Antriebsleistungen bei spanenden Bearbeitungsverfahren.

k_c spezifische Schnittkraft in N/mm^2

h Spanungsdicke in mm

f Vorschub in mm

a_p Schnitttiefe in mm

κ Einstellwinkel in Grad ($^\circ$)

Die Spanungsdicke h hängt vom Bearbeitungsverfahren ab.
Berechnung der Spanungsdicken: Seite 298 und Seite 300.

Aus: Tabellenbuch Digital, Europaverlag Haan- Gruiten

Richtwerte für die spezifische Schnittkraft¹⁾

Werkstoff	spezifische Schnittkraft k_c in N/mm ² für die Spanungsdicke h in mm												
	0,05	0,08	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,40	0,50	0,80	1,00	1,50	2,00
S235	3850	3555	3425	3195	3040	2930	2840	2705	2605	2405	2315	2160	2055
E295	5635	4990	4705	4235	3930	3710	3535	3285	3100	2740	2585	2330	2160
E355	4565	4215	4055	3785	3605	3470	3365	3205	3085	2850	2745	2560	2340
C15, C15E	4575	4125	3925	3590	3370	3210	3085	2895	2755	2485	2365	2165	2030
C35, C35E	4425	3895	3670	3290	3045	2865	2725	2525	2375	2095	1970	1765	1635
C45, C45E	4760	4210	3975	3575	3320	3130	2985	2770	2615	2315	2185	1965	1825
C60, C60E	4750	4365	4190	3895	3700	3555	3440	3265	3135	2880	2770	2575	2445
11SMnPb30	2675	2460	2360	2195	2085	2000	1935	1840	1765	1625	1560	1450	1375
16MnCr5	5950	5265	4965	4470	4150	3915	3735	3465	3270	2895	2730	2455	2280
20MnCr5	5775	5135	4855	4385	4085	3860	3690	3435	3245	2885	2730	2475	2295
18CrMo4	4955	4575	4405	4110	3915	3770	3655	3480	3350	3095	2975	2780	2645
34CrAlMo5	4930	4360	4115	3705	3435	3245	3095	2870	2710	2395	2260	2035	1890
42CrMo4	7080	6265	5915	5320	4940	4660	4445	4125	3890	3445	3250	2925	2715
50CrV4	6290	5565	5250	4725	4385	4140	3945	3660	3455	3060	2885	2595	2410
102Cr6	5895	4910	4500	3840	3435	3145	2930	2620	2400	2000	1835	1565	1400
90MnCrV8	5610	5080	4850	4455	4195	4000	3850	3625	3460	3135	2990	2745	2585
X210CrW12	5155	4565	4305	3875	3595	3395	3235	3005	2835	2510	2365	2130	1975
X5CrNi18-10	5730	5190	4955	4550	4285	4085	3935	3705	3535	3200	3055	2805	2640
X30Cr13	5155	4565	4305	3875	3595	3395	3235	3005	2835	2510	2365	2130	1975
TiAl6V4	3340	3025	2890	2655	2495	2385	2295	2160	2060	1865	1780	1635	1540
GJL-150	2315	2100	2005	1840	1730	1650	1590	1500	1430	1295	1235	1135	1065
GJL-200	2805	2495	2360	2130	1985	1875	1790	1670	1575	1405	1325	1200	1115

Aus: Tabellenbuch Digital, Europaverlag Haan- Gruiten

ZERTIFIKAT

entsprechend DIN 10204 – 3.1
Stäbe Grad 5

Material: Stäbe
(Material)
Werkstoff: Titan 6AL4V GR.5
(Alloy)
Spezifikation: DIN 3.7164.1
(Specification)
Ausführung: gegläht,
(Layout)

Kunde (Customer)
vorherige Charge = <i>gut</i>

Intern. Code	übernommen aus Werksattest-Nr.	Kundeninformationen (Customer informations)

Charge (Heat)	Diameter (Diameter)	Gewicht (Weight)	Weitere Angaben (more details)
	50 mm	166 kg	

Mechanische Eigenschaften (Mechanical Properties)

Zugfestigkeit(Tensile) MPa Min > 900	Streckgrenze(Yield) MPa Min > 830	Dehngrenze(Elong.) % Min > 10	Brucheinschnürung (Reduction of Area) Min > 25%
920	855	14	42

Chemische Zusammensetzung (Chemical Analysis)

N2 Max 0,05	C Max 0,08	H2 Max 0,0125	FE Max 0,30	O2 Max 0,20	Al 5,5-6,75	V 3,5-4,5	TITAN	Andere Werkst (other material) Einzel Max 0,1	Andere Werkst (other material). Gesamt Max 0,4
0,029	0,032	0,0063	0,093	0,15	6,24	4,09		< 0,1	< 0,4

Weitere Informationen (Also Meets)

Abmessungen und Besichtigung Ok
Macrostrukturtest OK
Microstrukturtest OK
Ultraschalltest OK

ZERTIFIKAT

nach DIN 10204 – 3.1
Stäbe Grad 5

Material: Stäbe
(Material)
Werkstoff: Titan 6AL4V
(Alloy)
Spezifikation: W3.7164.1 wie W3.7164 Teil 2,
(Specification) H11 zugrunde gelegt
Ausführung: gegläht
(Layout)

Kunde (Customer)
Aktuelle Charge = <i>Schlacht</i>

Intern. Code	übernommen aus Werksattest-Nr.	Kundeninformationen (Customer informations)

Charge (Heat)	Diameter (Diameter)	Gewicht (Weight)	Weitere Angaben (more details)
	50 mm	165,50 Kg	Länge: 2900 – 3100 mm 6 Stück Losnummer 090601

Mechanische Eigenschaften (Mechanical Properties)

Zugfestigkeit(Tensile) MPa >= 896	Streckgrenze(Yield) MPa >= 827	Dehngrenze(Elong.) % >= 10	Brucheinschnürung (Reduction of Area) min 20 %
960	885	19	47

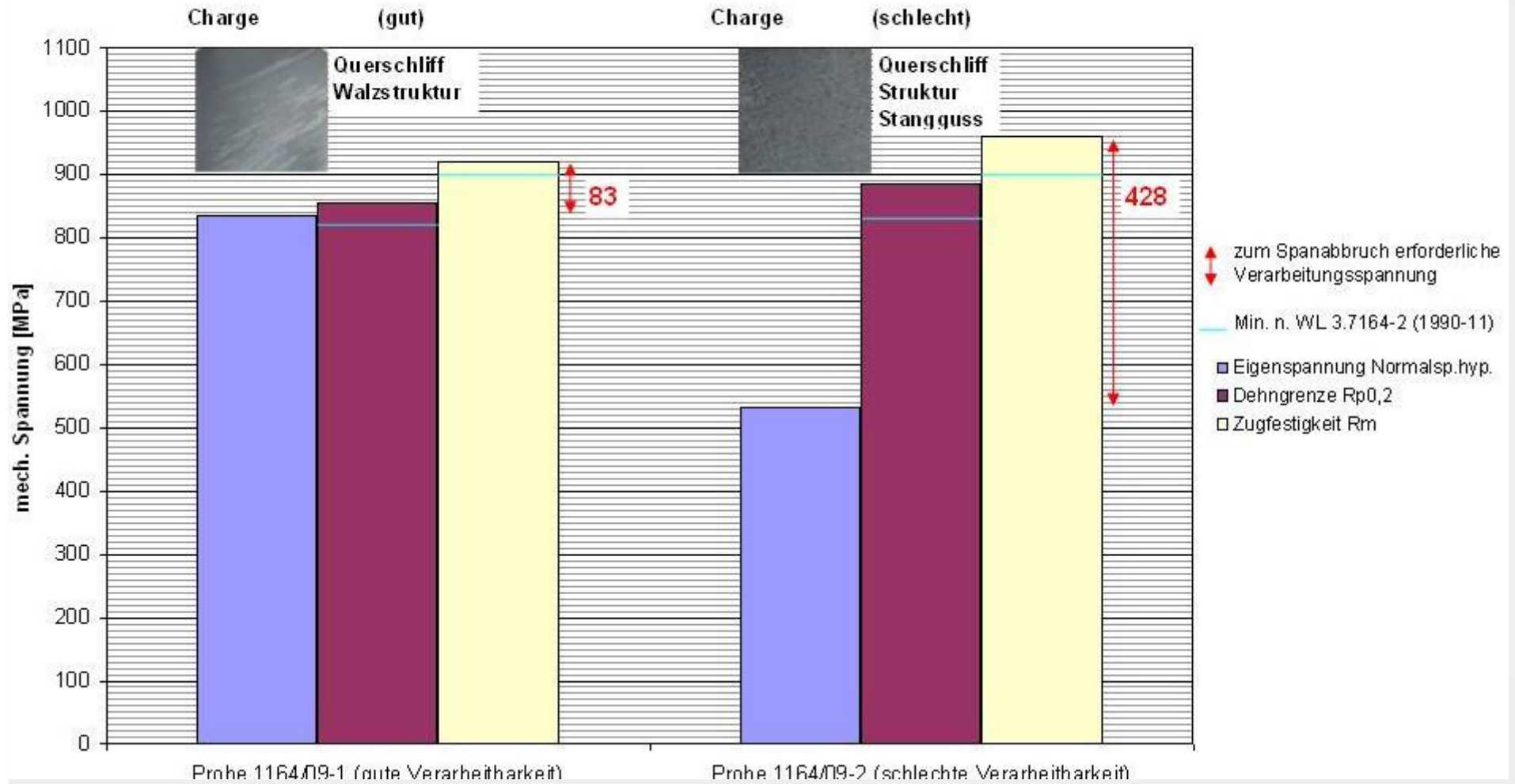
Chemische Zusammensetzung (Chemical Analysis)

N2 Max 0,05	C Max 0,08	H2 Max 0,010	FE Max 0,40	O2 Max 0,20	Al 5,5-6,75	V 3,5-4,5	TITAN	Andere Werkst. (other material) Einzel Max 0,1	Andere Werkst (other material). Gesamt Max 0,4
0,011	0,02	0,0002	0,13	0,14	6,30	4,16	REST	< 0,10	< 0,40

Weitere Informationen (Also Meets)

Abmessung und Besichtigung: OK
Ultraschalltest: OK
Oberflächenverschmutzungstest: OK

Gegenüberstellung der Eigenspannung im Vgerbleich zu den Kennwerten im Zugversuch (WZ) von TiAl6V4-Halbzeugen



Erklärungsansatz:

- Im Drehprozess wird der vorliegenden Scher- (τ) und der Druckeigenspannung (δ_N) die Verarbeitungsspannung (ebenfalls in Scher- und in Druckrichtung) des aufgestauten Spanes überlagert.
- Wird die Scherfestigkeit bzw. Druckfestigkeit des Materials überschritten, bricht der Span ab.
- Die Zugfestigkeit der guten Probe liegt mit 920 MPa deutlich niedriger als bei der schlechten (960 MPa).
- Durch die hohen Druck- (δ_N) und Schereigenspannungen (τ) kommt es bei der guten Probe im Stauchbereich des Spanes eher zum Spanabbruch als bei der schlechten.

**Die Spezifikationen nach
WL 3.7164.1: 1990-11
reicht zur Gewährleistung einer
guten spanenden Verarbeitbarkeit
von TiAl6V4 – Rundprofilen
nicht aus.**

Lösungsvorschlag:

In einer eigenen Spezifikation könnte der Klient festlegen:

- **Die Festlegung der metallurgischen Prozesse:**
 - **Abguss**
 - **Warm - und Kaltumformprozesse**
 - **Wärmebehandlungsprozesse**
- **Einführung einer oberen Grenze für die Zugfestigkeit**
- **Die Ausweisung des Eigenspannungszustandes**
- **Eine vorübergehende Überwachung des Eigenspannungszustandes bei jeder eingehenden Charge und**
- **eine statistische Auswertung der Zugfestigkeit aus den Werkzeugnissen (z.B. Auswertung Archivmaterial von bereits positiv verarbeiteten Chargen) wurde empfohlen.**

Literatur:

- (1) B. Eigenmann, E. Macherauch: „Röntgenographische Untersuchung von Eigenspannungszuständen in Werkstoffen“, Teil I – Teil IV; „Materialwissenschaften und Werkstofftechnik“; Jg. 1995; S148-160, 199-216, 426-437, 491-501
- (2) H. J. Hunger u.a.: „Ausgewählte Untersuchungsverfahren in der Metallkunde“; 2. Auflage 1987; VEB Deutscher Verlag der Grundstoffindustrie; Leipzig, Seite 117 ff.
- (3) L. Spieß u.a.: „moderne Röntgenbeugung“; 1. Auflage 2005; Teubner Verlag; Wiesbaden; Seite 295 ff.
- (4) M. Häting, G. Fritsch: “Depth Resolved non-destructive Residual Stress Measurements in TiAl6V4”; International Conference of Residual Stresses; 4, 1994, Baltimore, Md., Page 189-194
- (5) D.S. Kurtz, P.R. Moran u.a.: „Apparatus for rapid $\sin^2\psi$ – measurements and its application to titanium alloys“, The 5th international Conference on Residual Stresses; 1997; Linköping; Page 744-749
- (6) P. Rangaswamy u.a.: “The influence of thermal-mechanical processing on residual stresses in titanium matrix compounds”; Material Science and Engineering, Jg. 1997; page 200-209; Elsevier – Verlag; Ansterdam; NI
- (7) F. Beutinger: “Verformungsverhalten und Verformungskinetik von Titan technischer Reinheit und der Titanlegierung TiAl6V4 im Bereich niedriger homologen Temperaturen von 0,22 (180 °C) bis 0,48 (650 °C)“; Diss. an der TU Erlangen – Nürnberg 2006
- (8) Veröffentlichung des Fachlabors für Titan und Titanlegierungen an dem Institut für Werkstoffe der Technischen Universität Braunschweig, 2007, Seite 17 ff.