

Abkürzungsverzeichnis	vii
1 Einleitung, Motivation und Zielstellung	1
2 Titanaluminide	5
2.1 Gewinnung und Herstellung	6
2.2 Mechanische Eigenschaften	7
2.3 Oxidationsverhalten	10
2.3.1 Grundlagen der Metalloxydation	10
2.3.2 TiAl-Oxidation: Zeitlicher Verlauf, Massenzunahme, Oxidschichtaufbau	15
2.3.3 Einfluss äußerer Parameter	17
2.3.4 Ansätze zum Hochtemperaturoxidationsschutz	21
2.4 Der Halogeneffekt auf Titanaluminiden	21
2.4.1 Mechanismus des Halogeneffekts	22
2.4.2 Thermodynamische Berechnungen für Fluor	25
2.4.3 Beeinflussende Parameter	26
2.4.4 Zusammenfassung	27
3 Analysemethoden	29
3.1 Einleitung	29
3.2 Resonante Kernreaktionsanalyse mittels Protonen Induzierter Gamma-Strahlen Emission (PIGE)	30
3.2.1 Energieverlust und Wechselwirkungsmechanismen	30
3.2.2 Kernreaktionen zur Fluoranalyse	33
3.2.3 Zusammenhang zwischen γ -Ausbeute und Konzentration	35
3.2.4 Energy-Straggling	35
3.3 Nachweis von γ -Quanten mit Szintillationsdetektoren	41
3.4 Rutherford Backscattering Spectrometry (RBS)	42
3.4.1 Grundlagen	42
3.4.2 Qualitative Analyse: Rückstreuenergie und Masse des Stoßpartners	43
3.4.3 Reichweite der Projektile und analysierbare Tiefe	46
3.4.4 Quantitative Analyse: Rückstreuerausbeute und Häufigkeit der Stoßpartner	47
3.4.5 Vor- und Nachteile	47
3.4.6 Verwendung von RBS in dieser Arbeit	48
3.4.7 Detektion von Verunreinigungen mit schweren Elementen	48
3.4.8 Bestimmung der Tiefenprofile	49
3.4.9 Detektor für RBS	50

3.5	Ergänzende Analyseverfahren	50
3.5.1	Oxidationsexperimente	50
3.5.2	Mikroskopie	52
3.5.3	Röntgenstrukturspektroskopie / EDX-Analyse / EPMA	53
3.6	Zusammenfassung	54
4	Fluor–Tiefenprofilierung mit PIGE	55
4.1	Gegenspannungsmethode	55
4.2	Messgrößen	57
4.2.1	Messung der Projektilenergie	57
4.2.2	Messung der γ -Ausbeute	58
4.2.3	Messung des Projektilstroms	58
4.3	Umrechnung der Messgrößen	59
4.3.1	Umrechnung der γ -Ausbeute in Konzentrationen	60
4.3.2	Umrechnung der Projektilenergie in eine Tiefenskala	62
4.4	Berechnung der Dosis	63
4.5	Auswertealgorithmus	63
4.6	Auflösung und Empfindlichkeit	64
4.6.1	Tiefenauflösung	64
4.6.2	Empfindlichkeit und Nachweisgrenze	69
4.6.3	Fehlerbetrachtung	73
4.7	Interferenzen zwischen benachbarten Resonanzen	75
4.8	Eine korrektere F-Tiefenprofilierung: Mitberücksichtigung der RBS-Analyse	77
4.8.1	Berechnung der oxidischen Zusammensetzung aus der elementaren Zusammensetzung	77
4.8.2	Ermittlung einer korrekten Tiefenskala der Fluor-Verteilung	79
4.8.3	Korrektur der F-Konzentrationen	80
4.9	Zusammenfassung	81
5	Materialmodifikation	83
5.1	Beamline-Ionenimplantation BLI ²	83
5.1.1	Grundlagen	84
5.1.2	Simulation der Implantationsprofile	85
5.1.3	Einfluss der Implantationsparameter	90
5.1.4	Vergleich von Simulation und Analyse	94
5.1.5	Technik am IKF: Der Ionenimplanter	96
5.2	Alternative Verfahren	102
5.2.1	HF-Behandlung	103
5.2.2	PTFE-Behandlung	103
5.2.3	Kontrollierte Gasphasenfluorierung (GP)	104
5.2.4	Plasma-Immersions-Ionenimplantation (PI ³)	105
5.2.5	Zusammenfassung	106
6	Untersuchungen zum Einfluss ausgewählter Parameter auf die Wirksamkeit des Halogeneffekts	107
6.1	Die Fluorprofile als Indikator für einen erfolgreichen Effekt	108

6.1.1	Fluorverluste	108
6.1.2	Lokation der F-Verteilung	112
6.1.3	Zusammenfassung	115
6.2	Auswirkungen der Aufheizprozedur	116
6.2.1	PIGE-Analyse	116
6.2.2	RBS-Analyse	117
6.2.3	Untersuchung der Temperaturabhängigkeit	120
6.2.4	Zusammenfassung	124
6.3	Abhängigkeit von der Legierungszusammensetzung	125
6.3.1	γ -MET 100: positiver Halogeneffekt	129
6.3.2	TNBV2A: positiver Effekt	132
6.3.3	Ti ₃ Al: kein positiver Effekt	134
6.3.4	Al-Verarmung durch Implantation	138
6.3.5	Thermogravimetrische Messungen	138
6.3.6	Zusammenfassung	140
6.4	Vergleich verschiedener Fluorapplikationsmethoden	140
6.4.1	Physikalische und chemische Fluorierungsmethoden	141
6.4.2	Probenvorbereitung	141
6.4.3	Fluorierung und Ermittlung der F-Tiefenprofile vor Oxidation	141
6.4.4	Oxidation und Thermogravimetrische Analyse	143
6.4.5	PIGE-Analysen nach Oxidation	146
6.4.6	RBS-Analysen nach Oxidation	148
6.4.7	Zusammenfassung	152
6.5	Applikation und Analyse auf Abschnitten industrieller Bauteile	153
6.5.1	Material und Probenvorbereitung	153
6.5.2	Fluorierung	153
6.5.3	Oxidation	154
6.5.4	Fluortiefenverteilungen vor und nach Oxidation	154
6.5.5	Charakterisierung des Oxidschichtaufbaus mit RBS	159
6.5.6	Metallographische Untersuchung und EPMA	162
6.5.7	Vergleich mit den Ergebnissen aus PIGE und RBS	166
6.5.8	Vergleich der beiden Fluorierungsmethoden	168
6.5.9	Zusammenfassung	169
7	Konstruktion und Bau einer Analysenkammer für industrielle Bauteile	171
7.1	Anforderungen an die Analysenkammer und deren Realisierung	171
7.1.1	Industrielle Anforderungen	171
7.1.2	Experimentelle Anforderungen	172
7.1.3	Realisierung	173
7.2	Erste Testmessungen	175
7.2.1	Ionenstrommessung	175
7.2.2	Referenzproben	175
7.2.3	Messungen auf einer Turbinenschaufel	179
8	Zusammenfassung und Diskussion	181

Anhang	190
A Fehlerbetrachtungen für die PIGE-Methode	191
A.1 Gauß'sches Fehlerfortpflanzungsgesetz für die Konzentrationsbestimmung	191
A.1.1 Wiederholpräzision	191
B Laterale Homogenität der BLI ²	197
C Analytische Form der Abbremsquerschnitte (Stopping Power ϵ)	198
D Matrizen zur Ermittlung der oxidischen Zusammensetzung aus RBS-Elementverteilungen	199
D.1 TiAl	199
D.2 TNBV5	199
D.3 TNBV3	199
E Sputtervorgänge während F-Implantation	200
Literaturverzeichnis	201
Danksagung	215