

Modellierung der Wechselwirkung reaktiver Ionenstrahlen mit Aluminium

Workshop in Mühlleithen

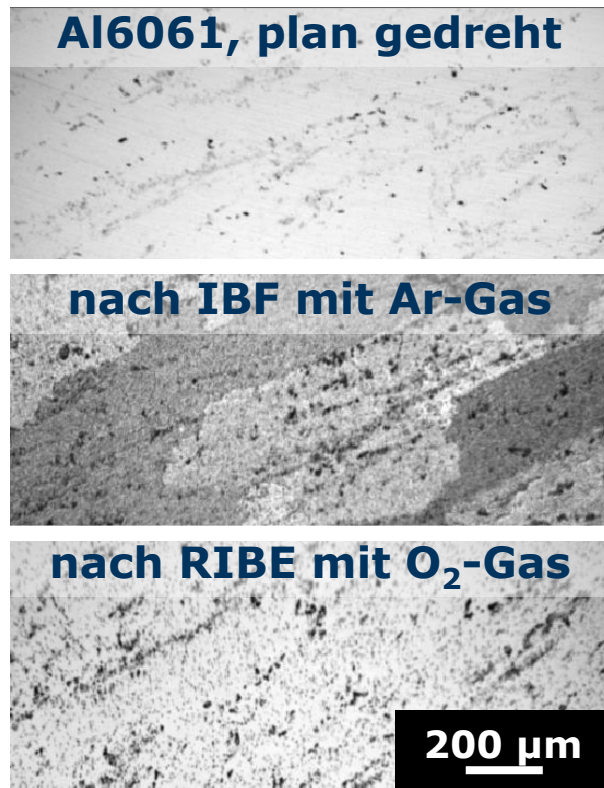
"Oberflächentechnologie mit Plasma- und Ionenstrahlprozessen,, – 06.-09. März 2017

INNOPROFILE
UNTERNEHMEN 
Die BMBF-Innovationsinitiative
Neue Länder REGION

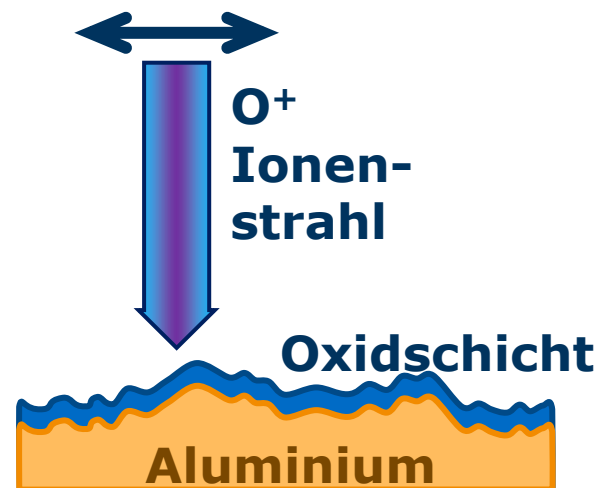
J. Bauer, F. Frost, T. Arnold

IOM
Leibniz-Institut für
Oberflächenmodifizierung e.V.

Formgebung von Al-Optiken



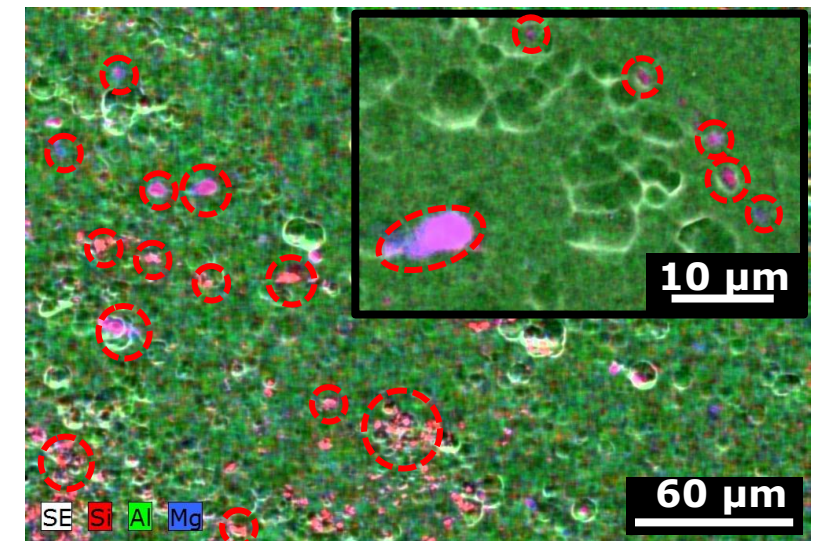
- Bearbeitungsmodell: vorantreibende Ätzfront, die die Oberflächenbeweglichkeit und Realstruktureinflüsse verringert



→ RIBE-Prozess ohne flüchtige, chemische Reaktionsspezies

- RIBE vielversprechend für Al-Oberflächenbearbeitung → moderater Rauheitsanstieg gegenüber IBF mit Ar

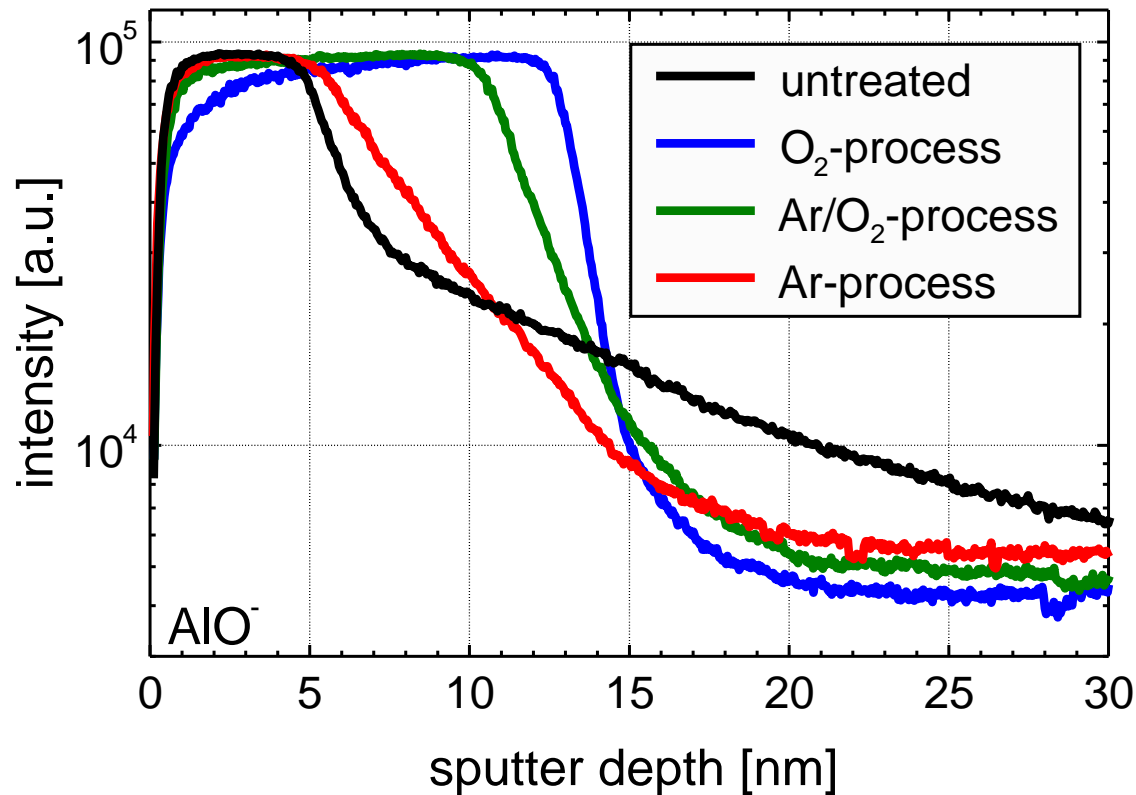
Bestehende Probleme:



- Ätzgrubendefekte durch Gefügestruktur verursacht → in Al905 deutlich vermindert gegenüber Al6061
- Geringe Ätzgeschwindigkeit

Ionenstrahl-Wechselwirkung mit dem Al-Substrat Zusammensetzungsanalyse

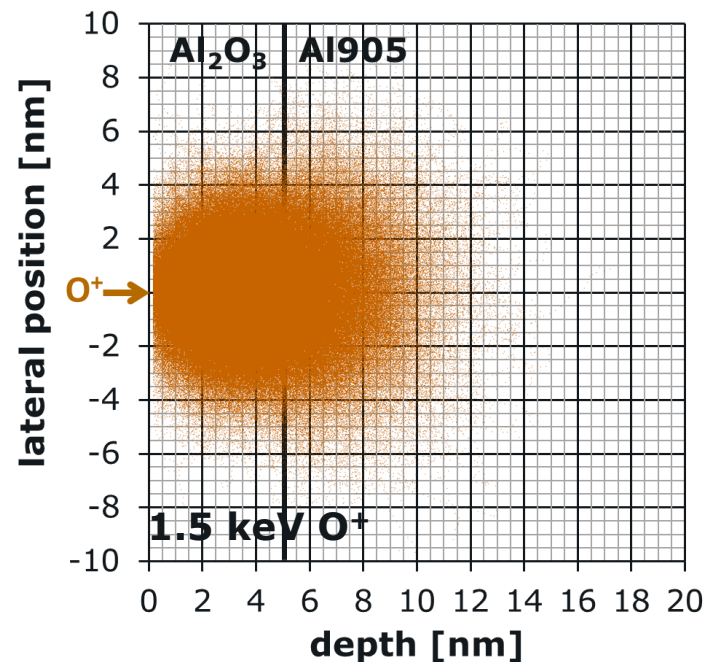
SIMS-Tiefenprofile



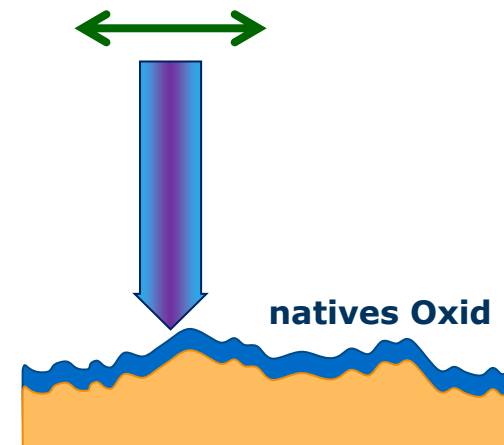
- ▮ Oxiddicke nach Ar-IBF entspricht unbearbeitetem Al → native Oxidschicht (instantane Bildung bei Kontakt mit Luft)
- ▮ O₂-Gehalt im Prozessgas ↑ → Oxiddicke ↑
- ▮ Oxiddicke unabhängig von der Prozessdauer

| Prozess | R _q @ 50-1000 nm | Oxiddicke |
|-------------------|-----------------------------|-----------|
| unbearbeitet | 4,0 nm | 5,7 nm |
| Ar | 13,8 nm | 7,3 nm |
| Ar/O ₂ | 13,1 nm | 11,3 nm |
| O ₂ | 6,9 nm | 13,0 nm |

Ionenstrahl-Wechselwirkung mit dem Al-Substrat Monte Carlo-Simulation



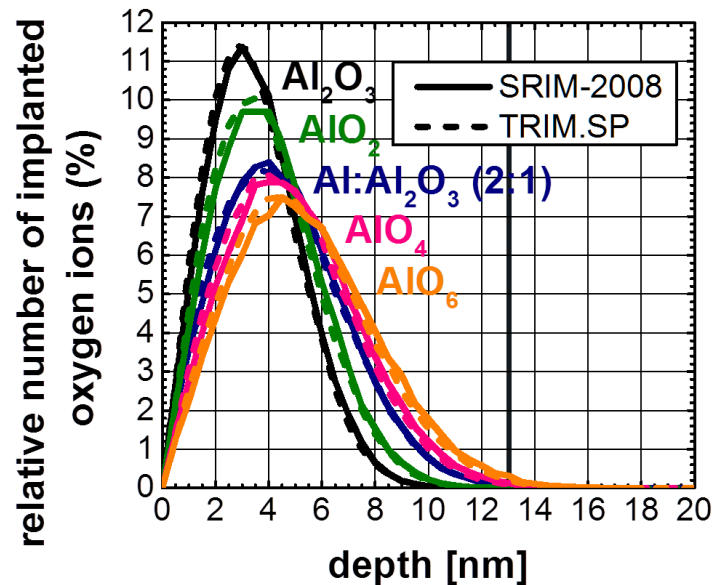
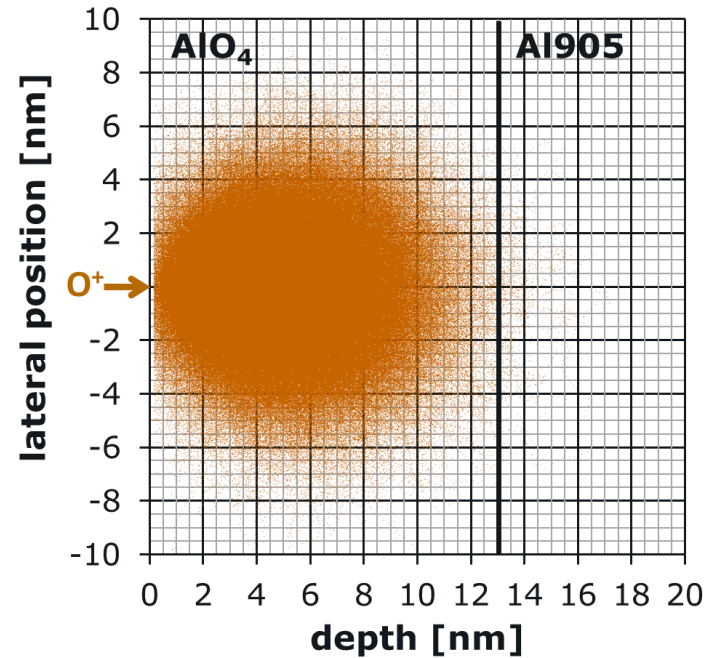
O₂-Prozessierung: Anfangsstadium



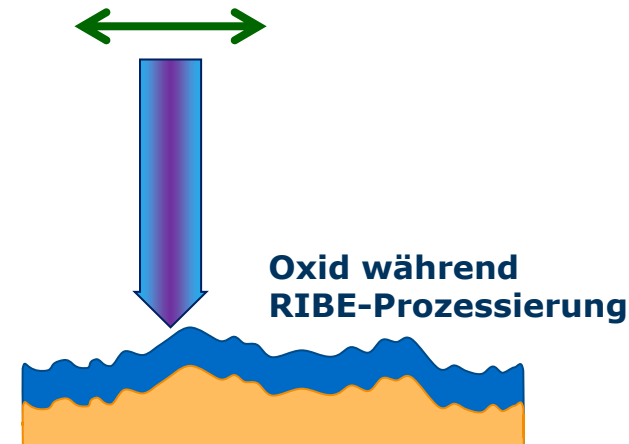
- TRIM.SP: Simulation der Ionentrajektorien im Substrat & des Zerstäubungsprozesses

- O⁺-Ionen dringen in die native Oxidschicht und Al-Volumenmaterial ein → Oxiddicke dehnt sich aus

Ionenstrahl-Wechselwirkung mit dem Al-Substrat



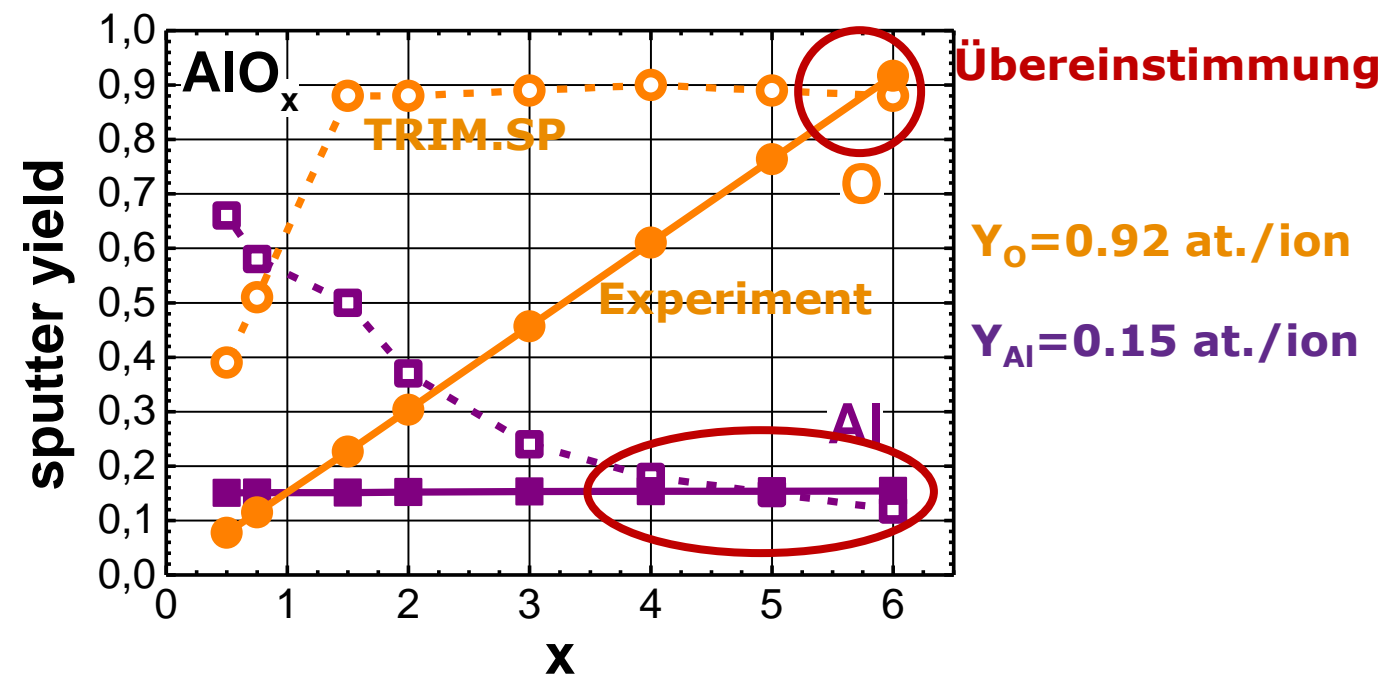
**O_2 -Prozessierung:
quasi-stationäres Prozessstadium**



vollständige O^+ -Ionenimplantation in der gebildeten Oxidschicht

Ionenstrahl-Wechselwirkung mit dem Al-Substrat

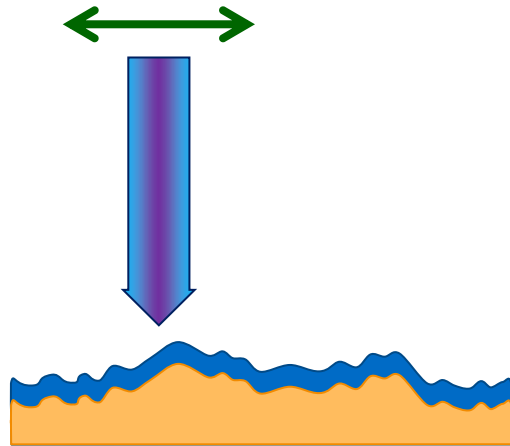
Sputterausbeute: 1,5 keV O⁺ auf AlO_x



- /// Sputterabtrag innerhalb des 1 nm oberflächennahen Bereichs
- /// Sputterausbeute → hoher O-Gehalt an der Oxidoberfläche
- /// $Y_O \approx 1$ → quasi-stationäres Materialgleichgewicht zwischen Implantation und Sputterabtrag

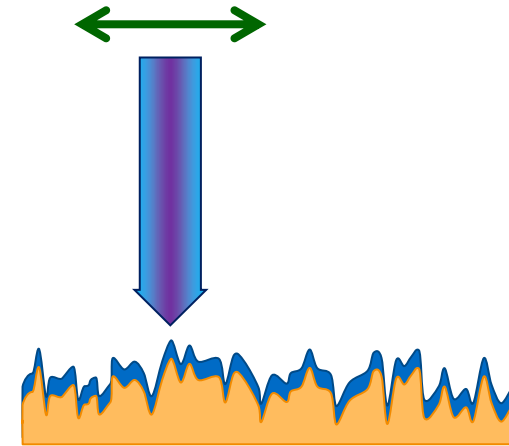
Einfluss der Mikrorauheit auf die Prozessstabilität

Mikrorauheit \ll Oxiddicke



- homogene Oxidbedeckung
- RIBE-Prozess rauheitserhaltend

Mikrorauheit \geq Oxiddicke

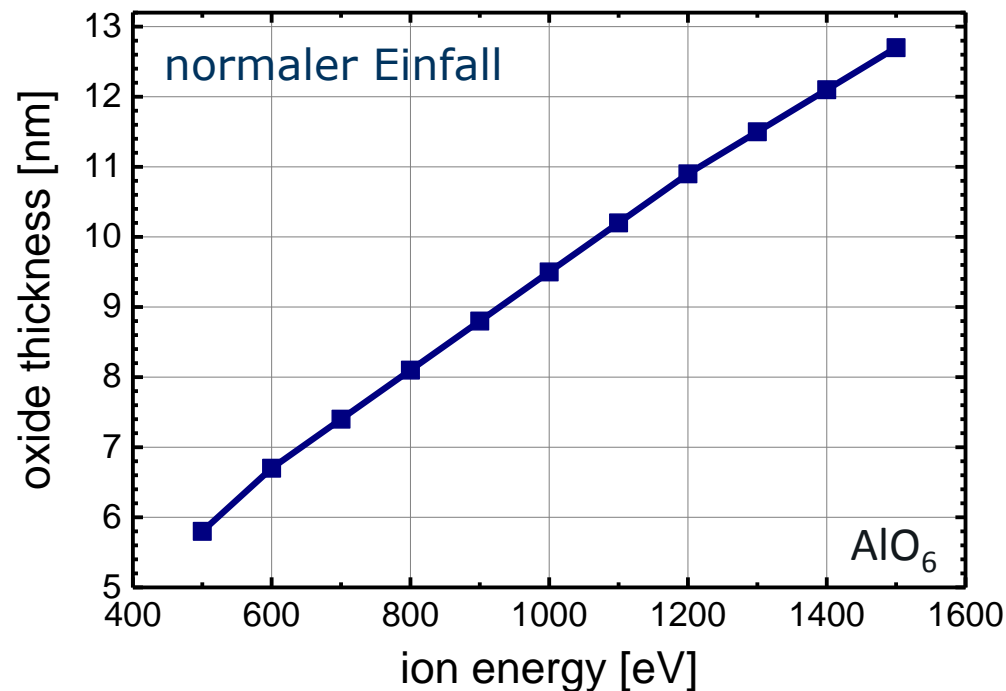


- geringe Oxiddicke an Gradienten
- Al-Direktzerstäubung im Bereich der Gradienten
 - Al-Ausbeute um Faktor 6 höher (+geometrischer Ausbeutezuwachs)
 - Oxid wirkt teilmaskierend
- Rauheitszunahme im RIBE-Prozess

Einfluss der RIBE-Parameter auf die Oxiddicke

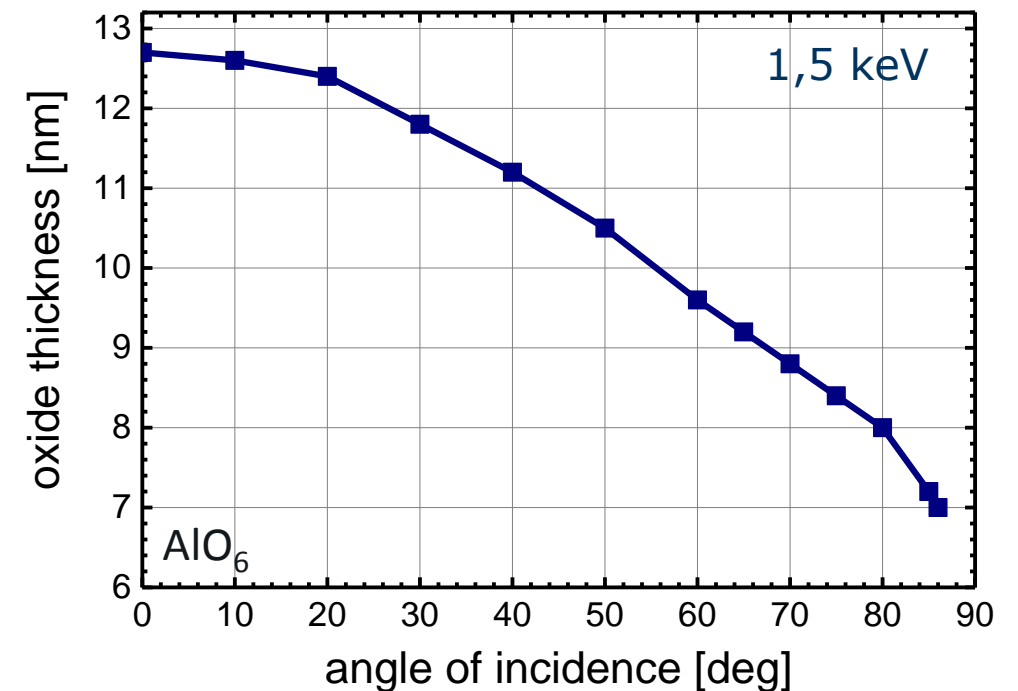
TRIM.SP: Oxiddicke = Implantationstiefenbereich, der 99,5% der einfallenden O^+ -Ionen umfasst

Ionenenergie



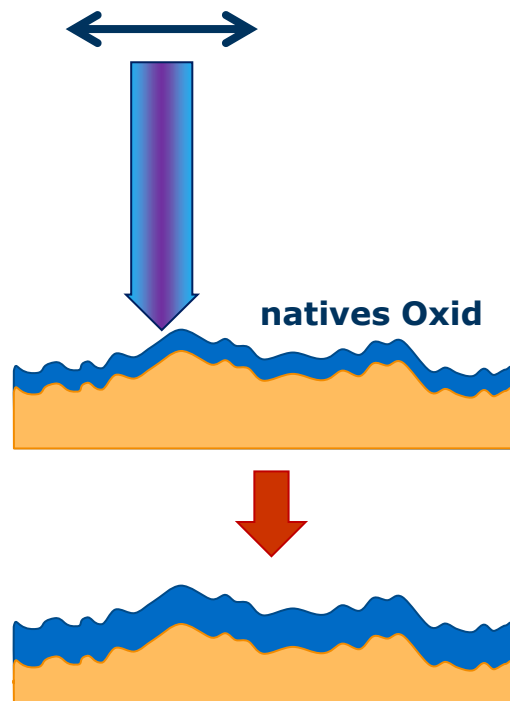
- /// Oxiddicke steigt mit der Ionenenergie
- /// RIBE-Prozess ab 1000 eV für übliche gedrehte Oberflächen ($R_q < 10$ nm) rauheitserhaltend

Einfallswinkel (zur Normalen)



- /// Oxiddicke sinkt mit zunehmendem Einfallswinkel
- /// RIBE-Prozess bis 60° für übliche gedrehte Oberflächen ($R_q < 10$ nm) rauheitserhaltend

RIBE von Al mit O₂-Prozessgas



Zweistufiger Prozess:

- Anfangsstadium: expandierende Oxiddicke bis zu einer Dicke von 12-15 nm
- quasi-stationäres Stadium: konstante Oxidschichtdicke & Ätzgeschwindigkeit

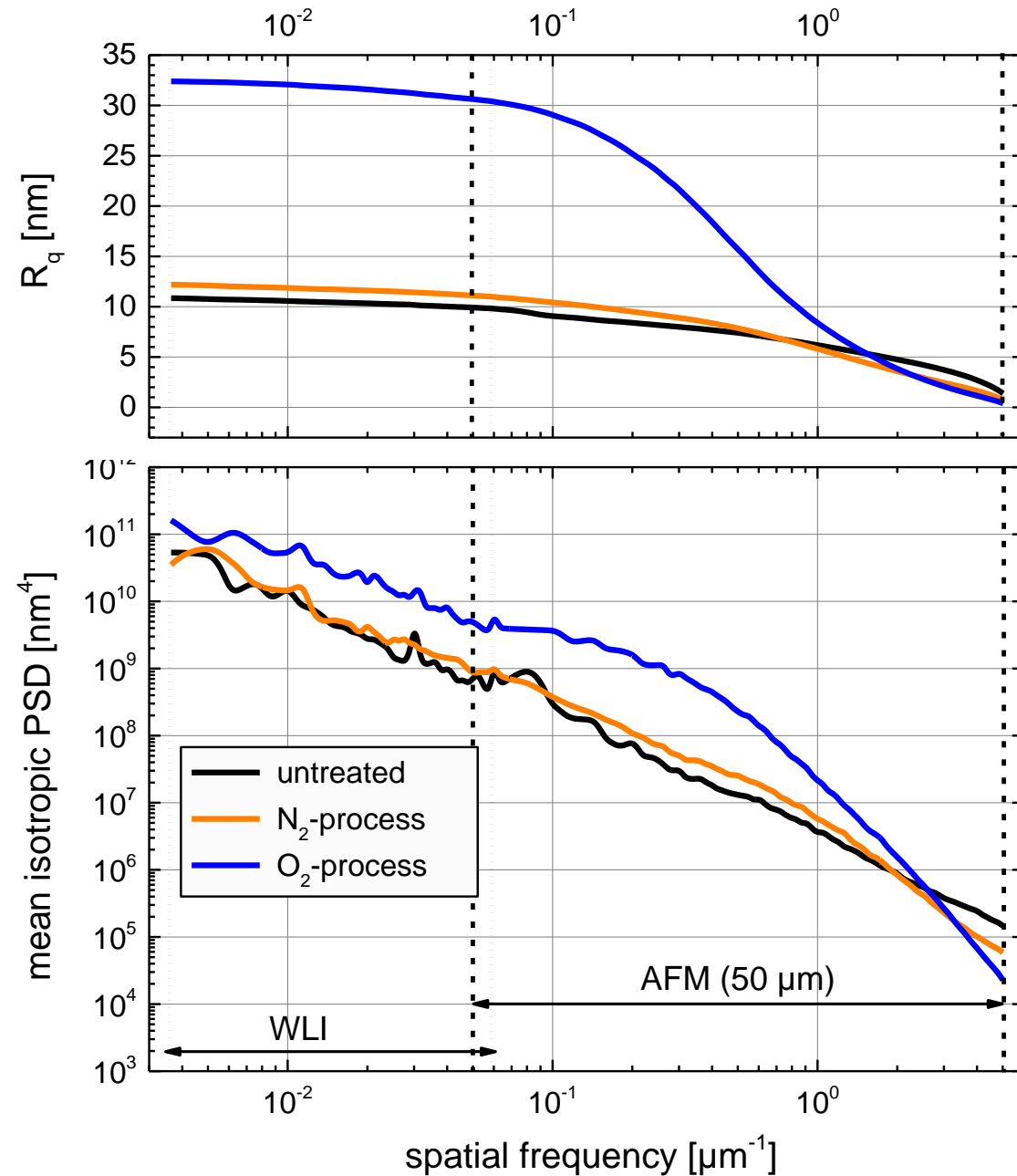
Vorteile der Prozessführung:

- RIBE ohne flüchtige Spezies möglich
- Oxid hemmt Al-Oberflächenbeweglichkeit
- Oxid passiviert Struktur- und Kompositionsinhomogenitäten des Al-Matrixmaterials
- Ausgangsstruktur der Oberflächen wird in die Tiefe übertragen

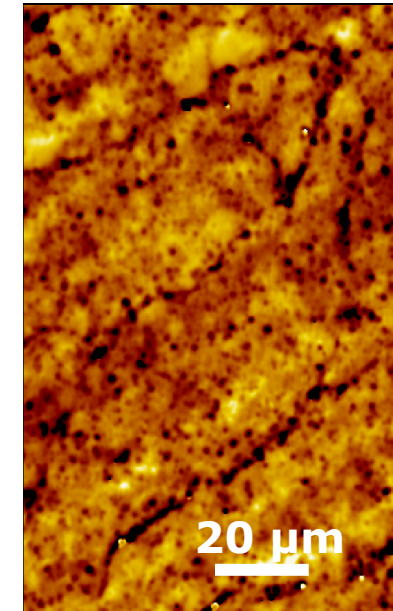
Offene Punkte:

- Ätzgrubenbildung
- Oberflächenschicht kann die optischen Oberflächeneigenschaften verändern
- Implantationstiefe nimmt bei geringerer Ionenenergie und unter geneigtem Einfallswinkel ab → Berücksichtigung bei Planarisierung & Strukturübertrag
- Prozess auch mit anderen Prozessgasen möglich?

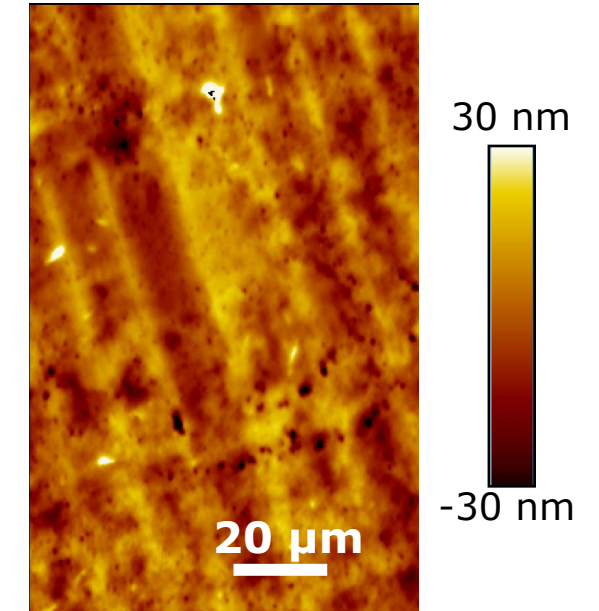
RIBE-Bearbeitung mit N₂-Prozessgas



O₂-Prozess (1,5 keV)
1 μm Abtrag



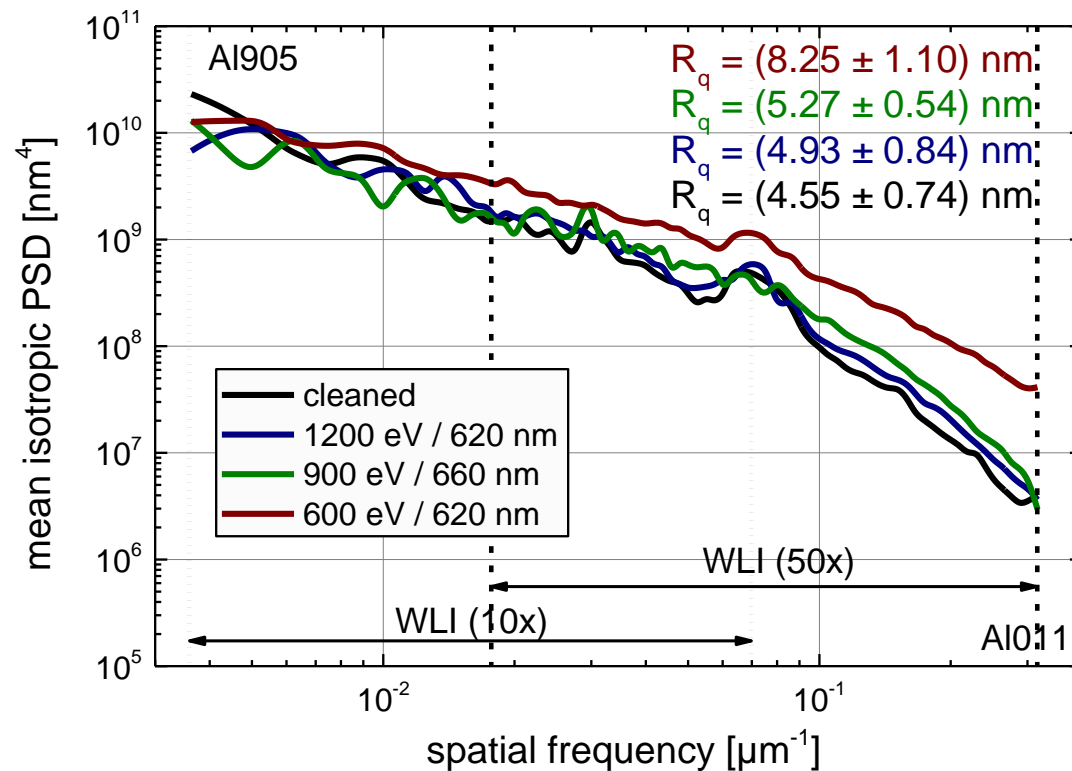
N₂-Prozess (1,5 keV)
1 μm Abtrag



- ▮ RIBE mit N₂: 11 nm dicke Nitridschicht (SIMS)
 - Ausgangsrauheit bleibt weitestgehend erhalten
 - bis 1 μm Abtragstiefe nachgewiesen
- ▮ Ätzgeschwindigkeiten:
 - $R(\text{O}_2) = 0,172 \text{ mm}^3/\text{h}$
 - $R(\text{N}_2) = 0,479 \text{ mm}^3/\text{h}$
 - $R(\text{Ar}) = 0,894 \text{ mm}^3/\text{h}$

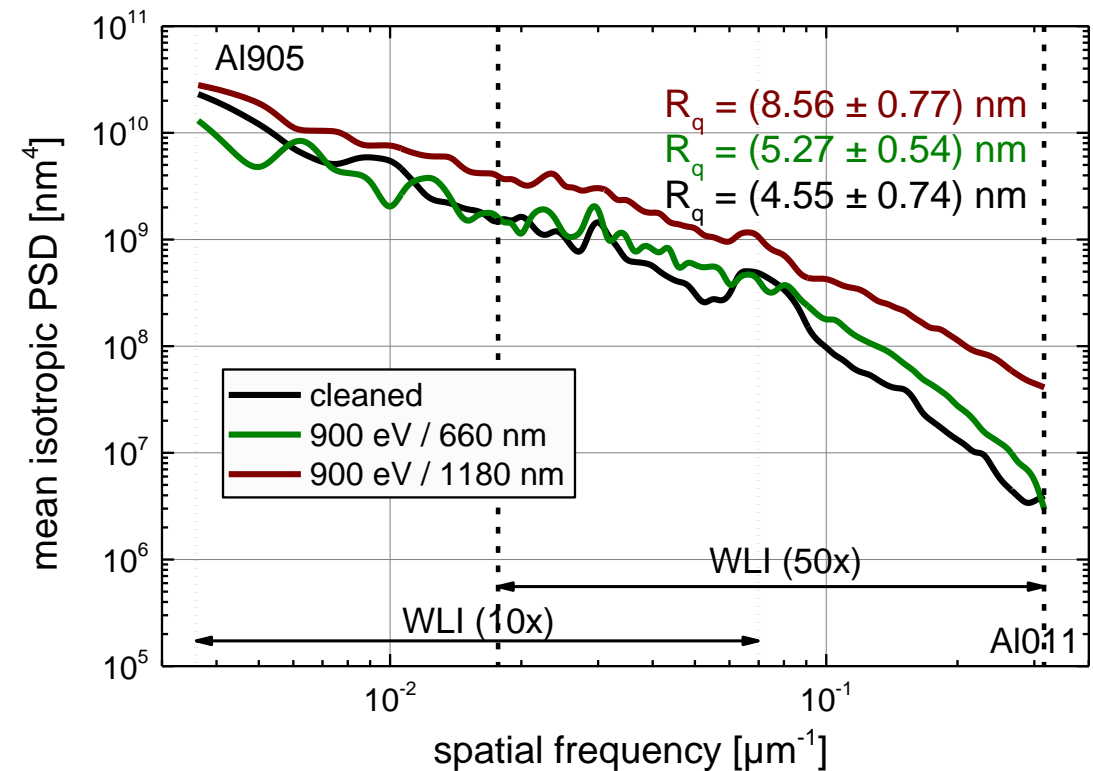
Rauheit vs. Ionenenergie – N₂-Prozess

Variation der Ionenenergie



- /// Rauheitserhaltung ab 1,2 keV
- /// bei 600 eV deutliche Degradation
- /// Ätzgrubenbildung bei 600 & 900 eV

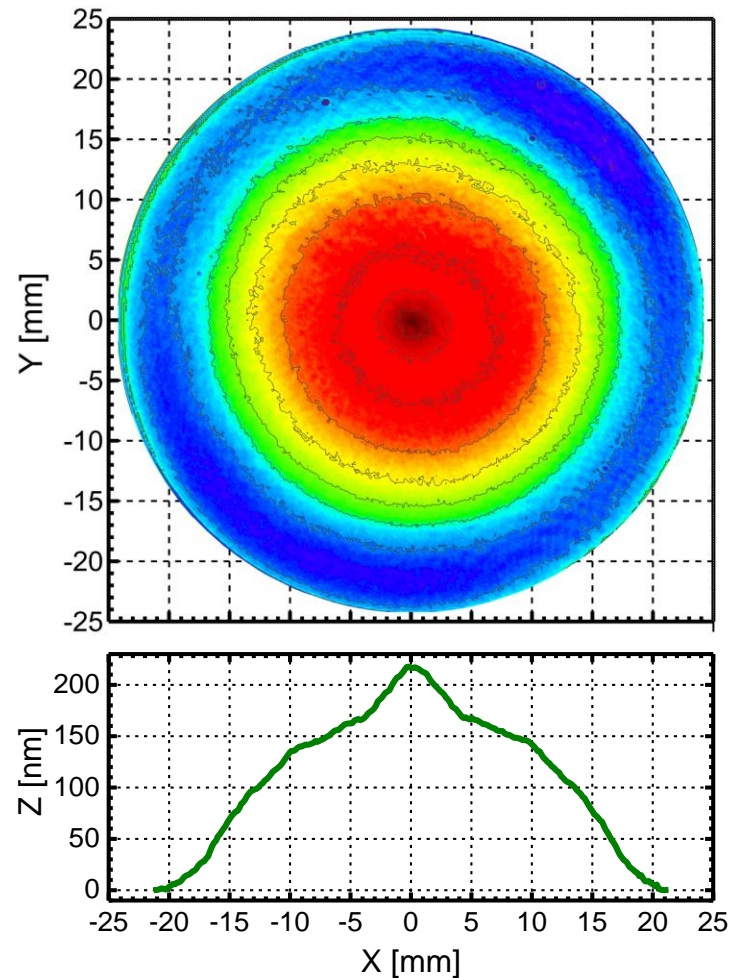
Zeitverhalten bei 900 eV



- /// Degradation nimmt mit der Abtragstiefe zu
- /// bei 900 eV:
keine Rauheitserhaltung bei 1 μm Abtrag

Formfehlerkorrektur nach dem Diamantdrehen

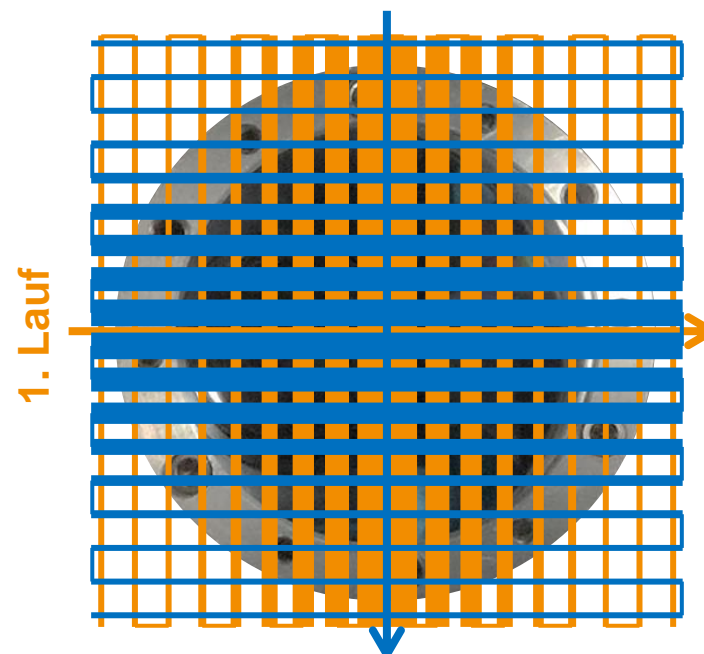
Oberflächenform



Zielstellung:

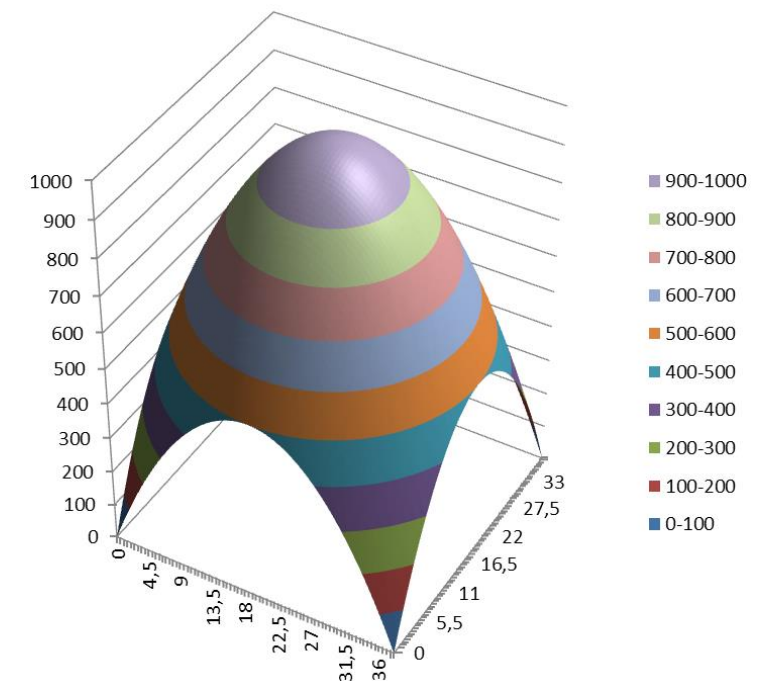
- Teilkorrektur der Drehform durch Abtrag in Paraboloid-Form
- Überlagerung zweier linearer Parabelabtragsprofile (Kreuzbearbeitung)
- 100 nm Mittenkorrektur

Kreuzbearbeitung 2. Lauf



Zeilengeschwindigkeit in der Bauteilmitte langsamer

Paraboloid-Abtragsform

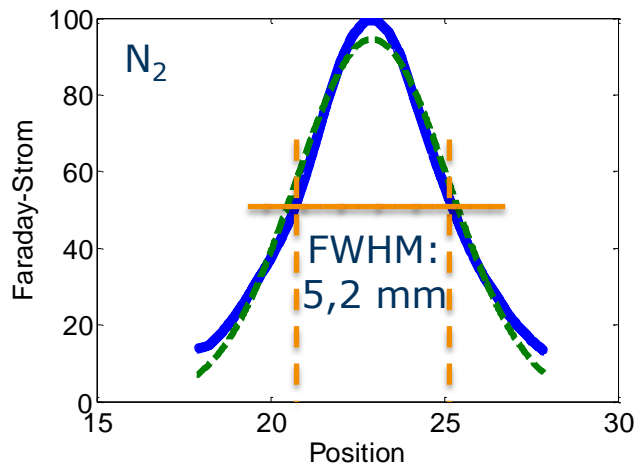


Formfehlerkorrektur nach dem Diamantdrehen

N₂-Prozess: Werkzeugfunktion

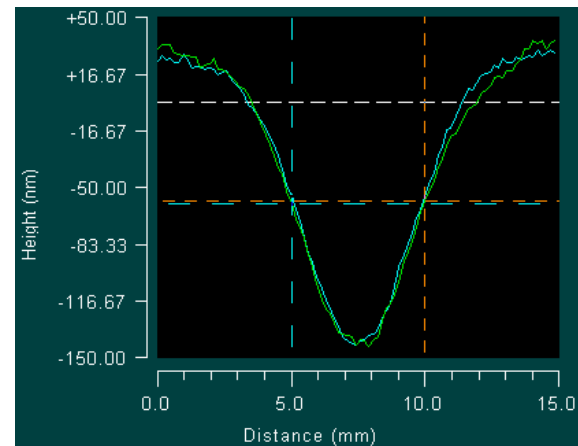
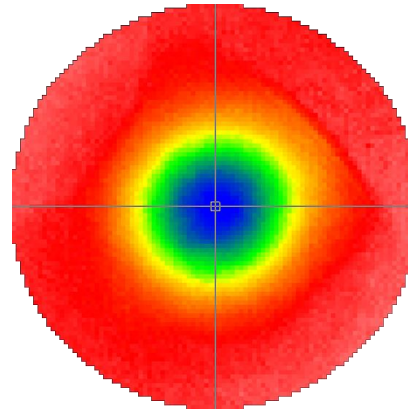
Faraday-Profil

1,5 keV N⁺/N₂⁺-Ionenstrahl



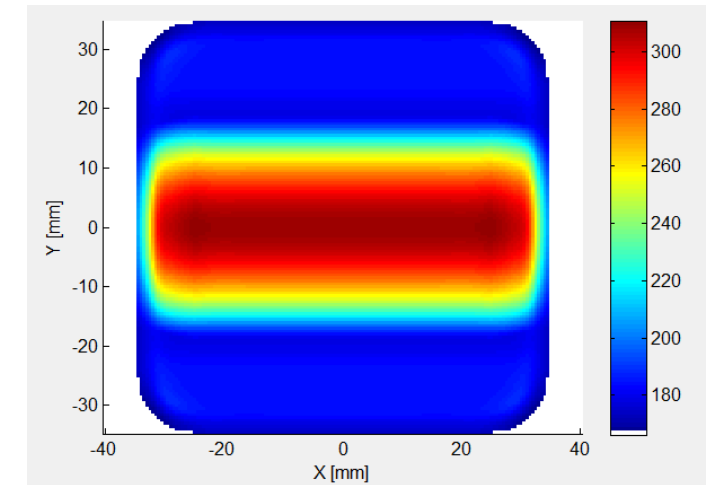
- ▮ Gauß-förmiges Footprint-Profil
- ▮ linearer Profilübertrag

Footprint-Profil

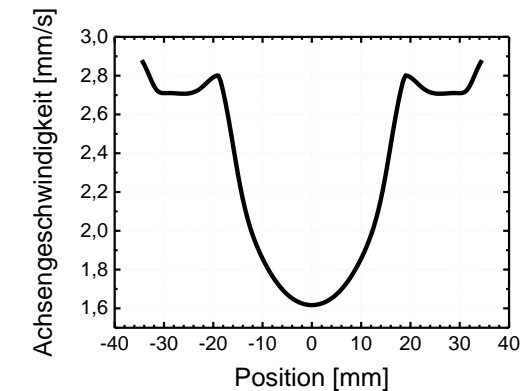


- ▮ FWHM: 5,3 mm
- ▮ Abtrag: 0,80 mm³/h

Verweilzeiten



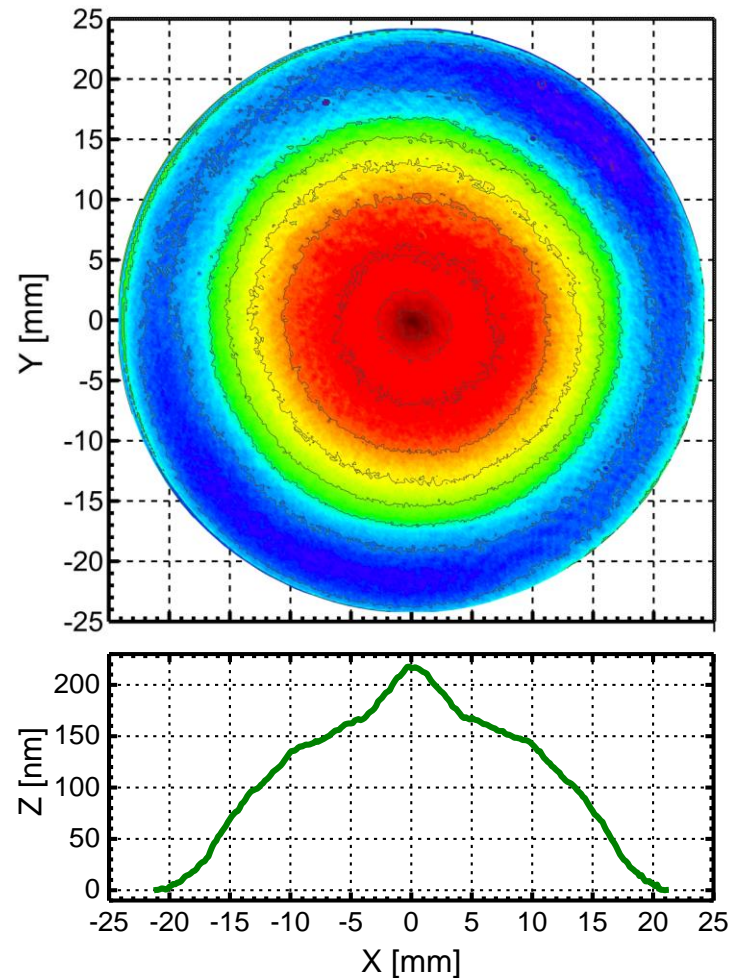
Geschwindigkeitsprofil



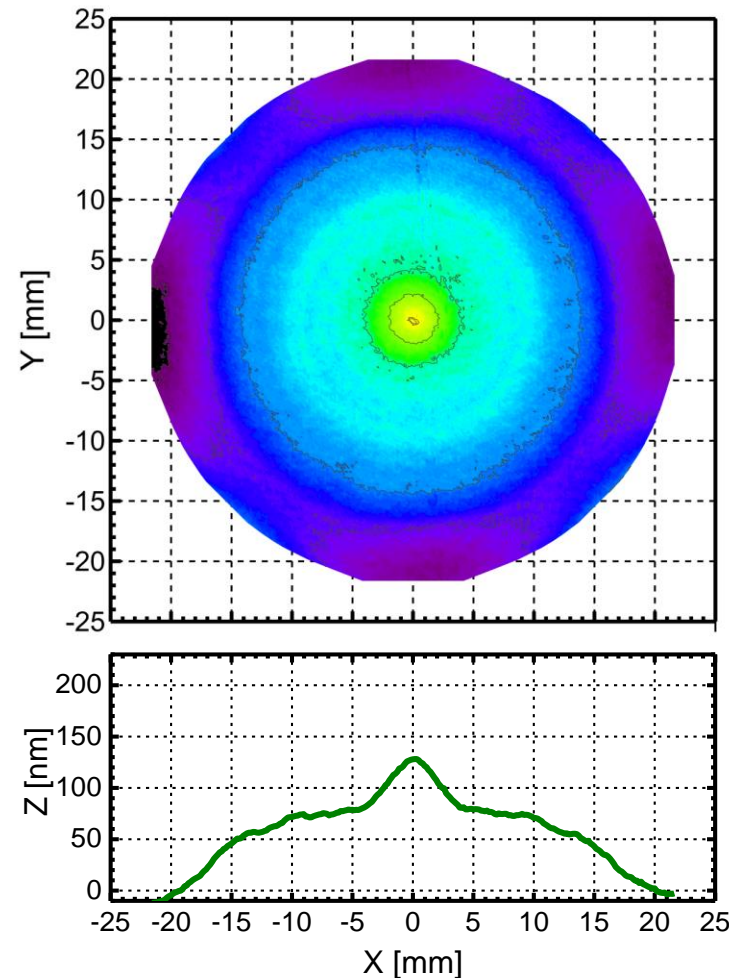
- ▮ Sockelabtrag: 146 nm je Einzellauf
- ➔ ca. 400 nm Mittenabtrag

Formfehlerkorrektur nach dem Diamantdrehen

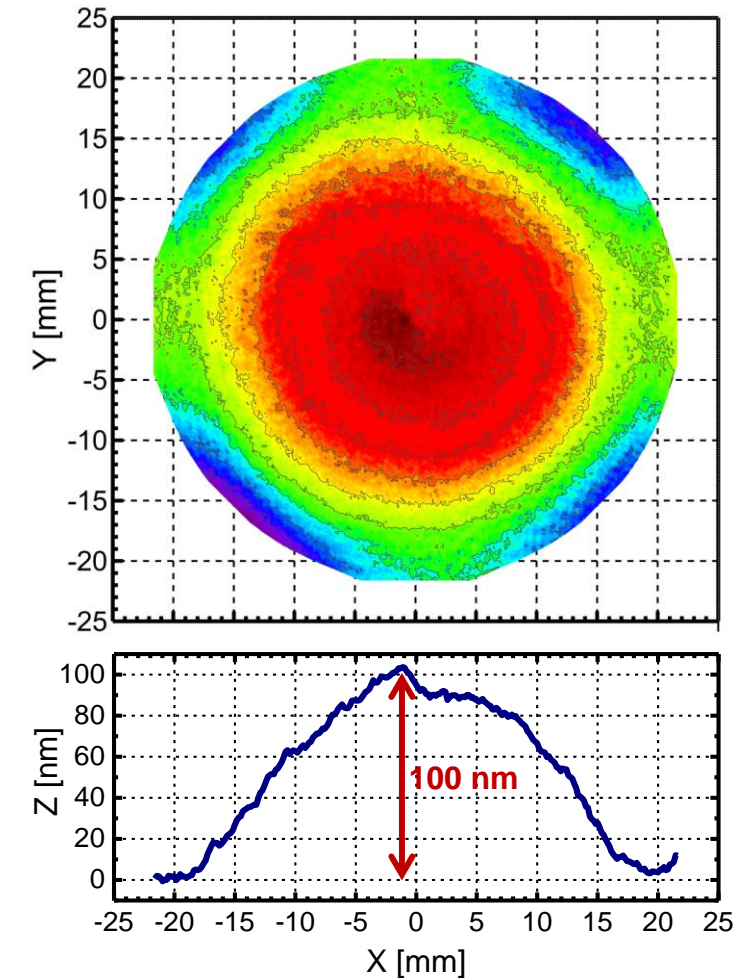
Ausgangszustand



nach RIBE-Korrektur



Abtrag



- ▮ tatsächlicher Abtrag entspricht Verweilzeitsimulation
- ▮ Asymmetrie im Randbereich durch quadratische Scanfeldgeometrie

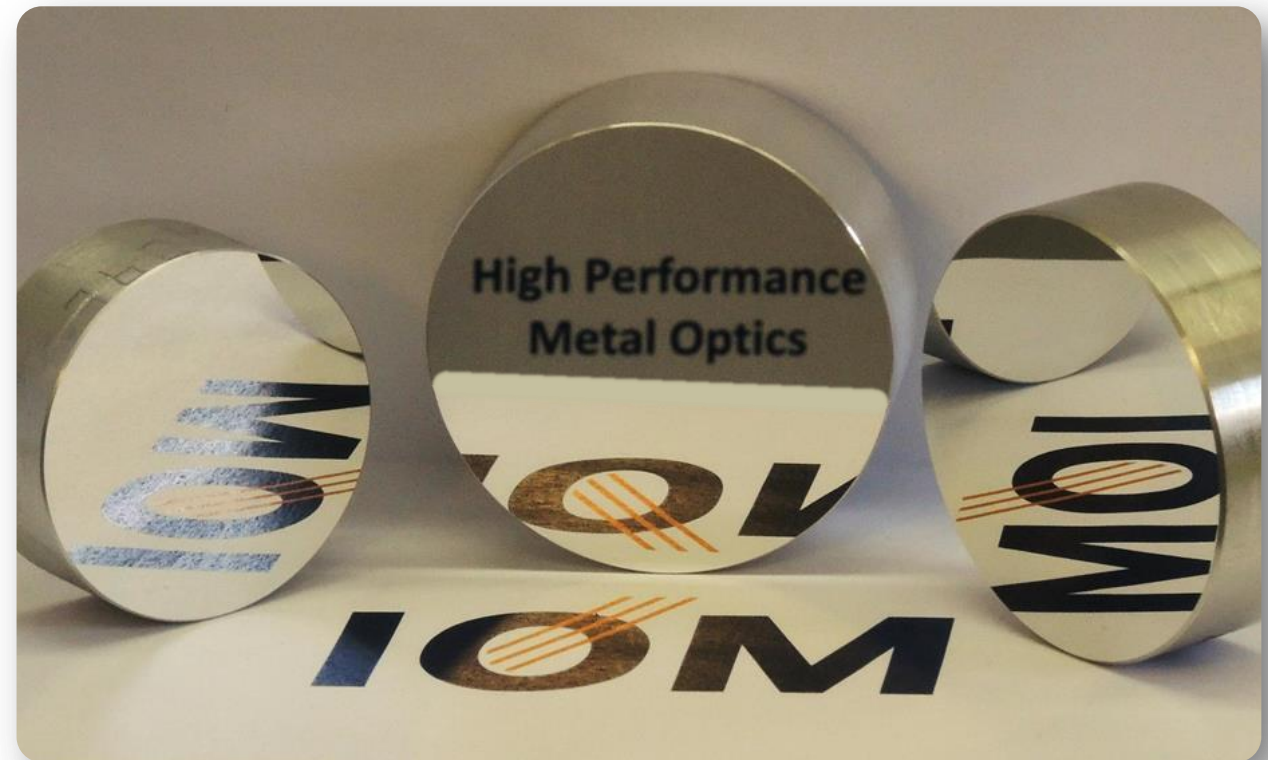
Zusammenfassung & Ausblick

- /// **Rauheitserhaltende RIBE-Bearbeitung** von Al-Oberflächen untersucht
 - Abtragsgeschwindigkeit ca. 20% (O₂) bzw. 50% (N₂) zu Ar-IBF
 - moderate Rauheitszunahme gegenüber IBF mit Ar
- /// **Bearbeitungsmodell**: vorantreibende Ätzfront, die durch Ionenimplantation und Abtrag dynamisch stabilisiert wird
- /// Prozessfähigkeitsnachweis für **1 µm Zielbearbeitungstiefe** (N₂ & O₂)
- /// **Formgebung mit N₂-Prozess** mittels Verweilzeittechnik

Herzlichen Dank für die Aufmerksamkeit!

Danksagung

- A. Gebhard, R. Steinkopf (IOF Jena)
- I. Herold, T. Liebeskind (IOM)
- F. Pietag (IOM)
- D. Hirsch (IOM)
- A. Nickel (IOM)



„ULTRAPRÄZISIONSBEARBEITUNG MIT ATOMAREN TEILCHENSTRAHLEN“