
Massenspektroskopische Untersuchungen am reaktiven Ar/SF₆/N₂-Plasmajet

Thomas Arnold

Leibniz-Institut für Oberflächenmodifizierung e.V. Leipzig

XI. Erfahrungsaustausch
Oberflächentechnologie mit Plasma-
und Ionenstrahlprozessen Mühlleithen
2.-4. März 2004

Gliederung

0. Motivation

Experimenteller Aufbau

Massenspektrometrische Messungen

Bestimmung von Fluorstromdichteprofilen

Zusammenfassung und Ausblick

Motivation und Zielstellung

- ∇ Massenspektrometrische Charakterisierung eines nichtthermischen reaktiven Mikrowellen-Plasmajets mit coaxialer Gasströmung (Hochrate-Ätzprozeß)
- ∇ Untersuchung der Einmischung des Reaktivgases SF₆ in das Trägergas Ar
 - Strömungsmechanische Simulation (kaltes Gas) zeigt, daß sich wegen der Viskositäten der Gase eine Durchmischung erst 20-50 cm nach der Düse einstellt
 - Ätzergebnisse zeigen aber, daß sich zumindest freies Fluor in einer gaußförmigen radialen Verteilung bilden muß

ortsaufgelöste **massenspektrometrische** Untersuchung zur Bildung von SF_x- und F-Radikalen in Abhängigkeit von den Prozeßparametern ($P_{\mu W}$, $[SF_6]$, (r,z))

Vergleich der experimentellen Befunde mit Simulationsdaten

Experimenteller Aufbau

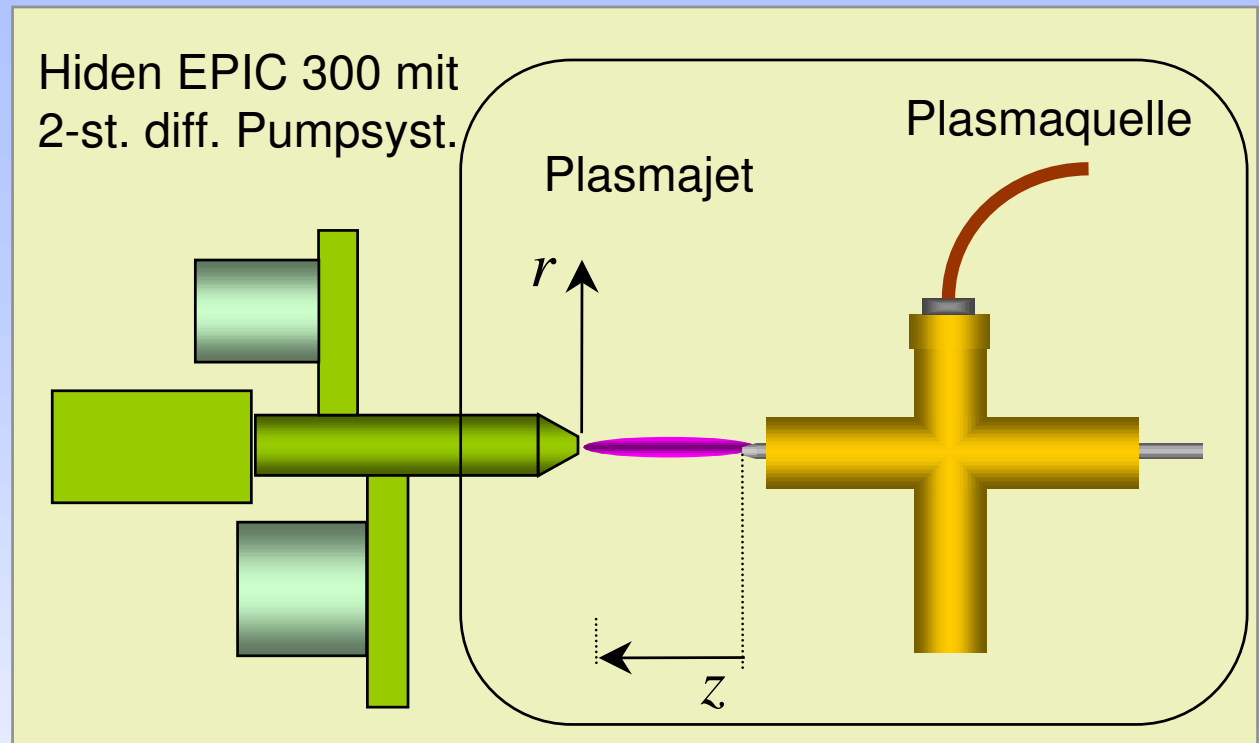
Prozeßparameter:

$P_{\mu W}$ = 60 W
 $p(N_2)$ = 50 mbar
[Ar] = 300 sccm
[SF₆] = 50 sccm

QMS-Modi:

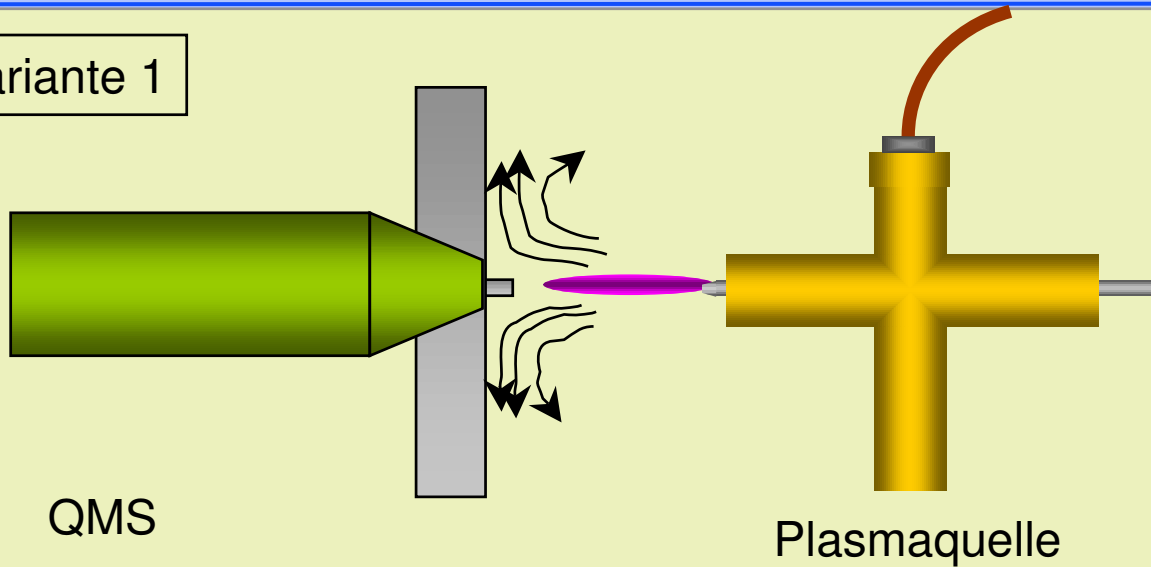
- RGA(+), $E_{ionis} = 70\text{eV}$
- APMS (+), $E_{ionis} = \text{var.}$
- EAMS (-), $E_{ionis} = \text{var.}$

- Ortsaufgelöste Detektion von Neutralteilchen (Radikale) mit vereinfachter APMS
- Nachweis von Fluor und anderen elektronegativen Spezies auch über EAMS (einfacheres Crackmuster)



Experimenteller Aufbau

Variante 1

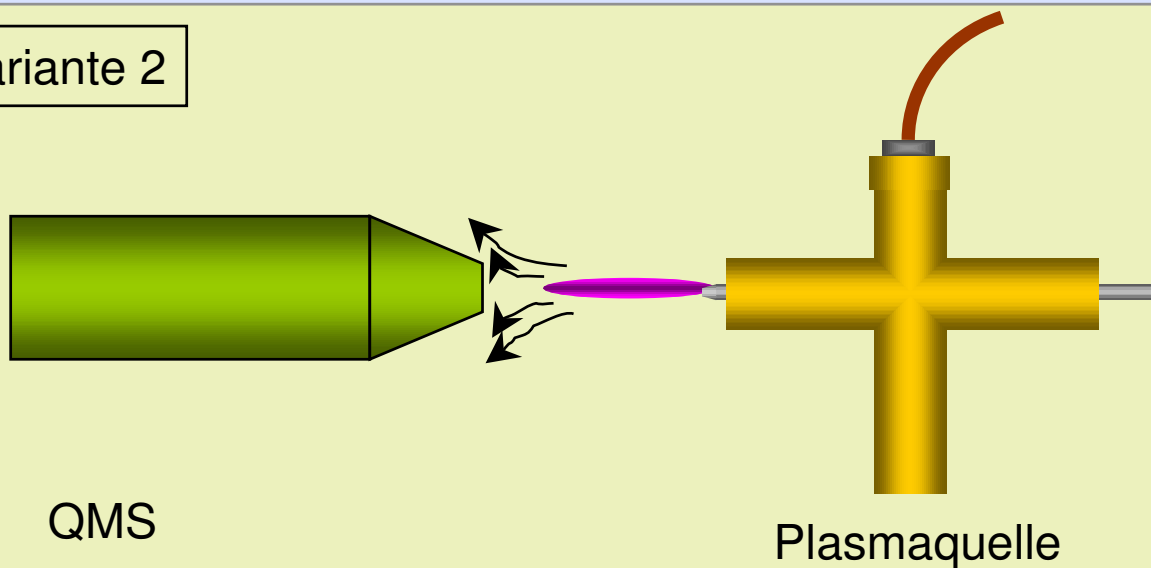


- Detektion von axial strömendem Gas
- Radiales Profil fast nicht gestört

Nachteil:

- Keine Radikale detektierbar, Gasstau

Variante 2



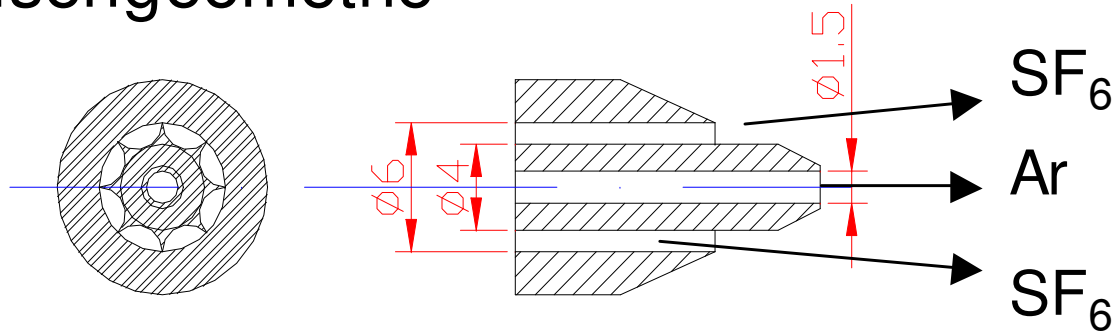
- Radikale detektierbar

Nachteil:

- Axial- und Tangentialströmung überlagern sich (Staupunktströmung)
- Radiales Profil ist verbreitert

Experimenteller Aufbau der Plasmaquelle

Düsengeometrie

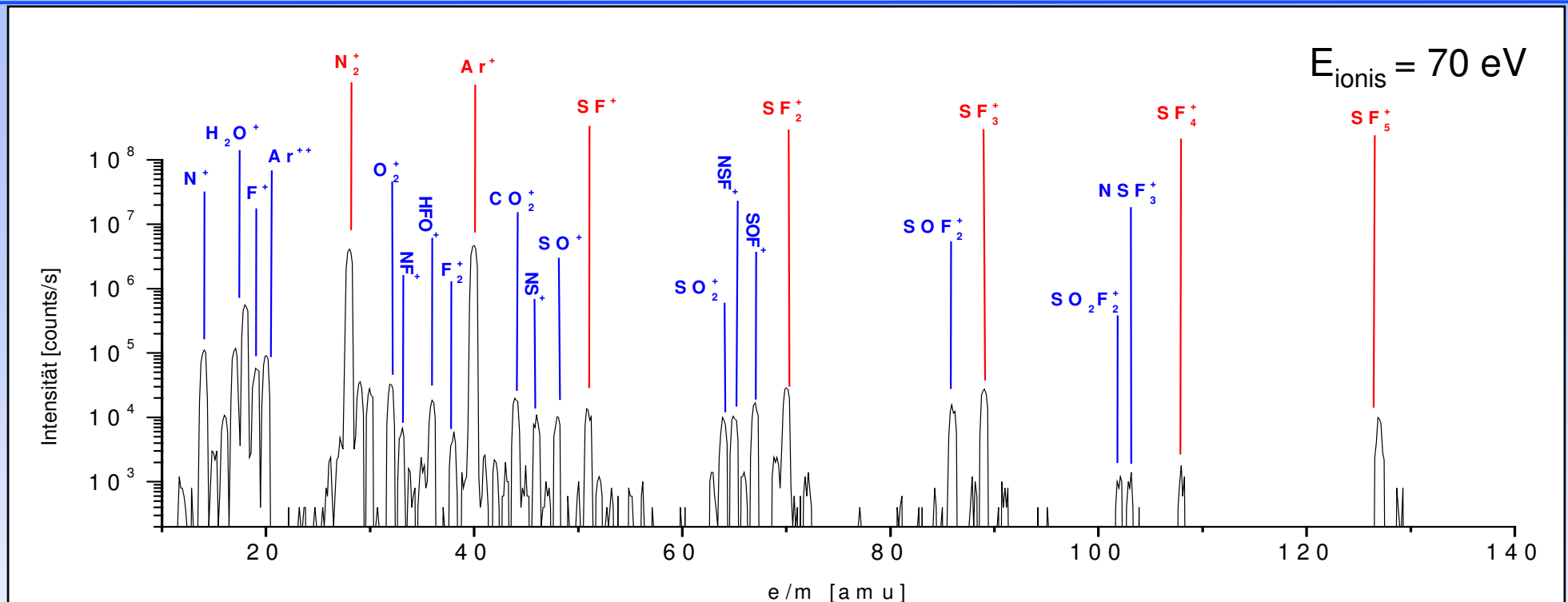


- Koaxiales Gaszuführungssystem
- damit erst möglich, im Niederdruckbereich Reaktivgas zuzuführen

ABER:

- Koaxialer Gasstrom mit unterschiedlichen Gasen hat komplexen Aufbau
- Radiales Gasverteilungsprofil hängt von Strömungsgeometrie (angeströmte Fläche) ab

Übersichtsspektrum SF₆-Plasma



Pos.: $z = 25 \text{ mm}$, $r = 4 \text{ mm}$

[Ar] = 300 sccm

[SF₆] = 50 sccm

P(N₂) = 50 mbar

P_{μW} = 60 W

Bestimmung von radialen Gasdichteprofilen

Kalibrierung:

$$I = \alpha \beta \sigma(E_{ionis}) n$$

$$\alpha \propto m^{-1}$$

- Intensität I kann mit Teilchendichte n korreliert werden
- Koeffizient β für Extraktion der Ionen aus der Ionisationkammer abhängig vom Ionisationsmechanismus:
 - direkte Ionisation: $\beta=1$ ($N_2 \rightarrow N_2^+$; $Ar \rightarrow Ar^+$)
 - dissoziative Ionis.: $\beta < 1$ ($SF_6 \rightarrow SF_5^+ + F$)

Ionisationsquerschnitte σ nicht immer bekannt (Abschätzung für SF_2 und SF)

- Referenzsignal: $I(N_2^+)$ (28 amu) bei $p = 50$ mbar

$$n_i = \frac{I_i}{I_{N_2}^{ref}} \frac{\alpha_{N_2} \beta_{N_2} \sigma_{N_2}(E_1)}{\alpha_i \beta_i \sigma_i(E_2)} n_{N_2}^{ref}$$

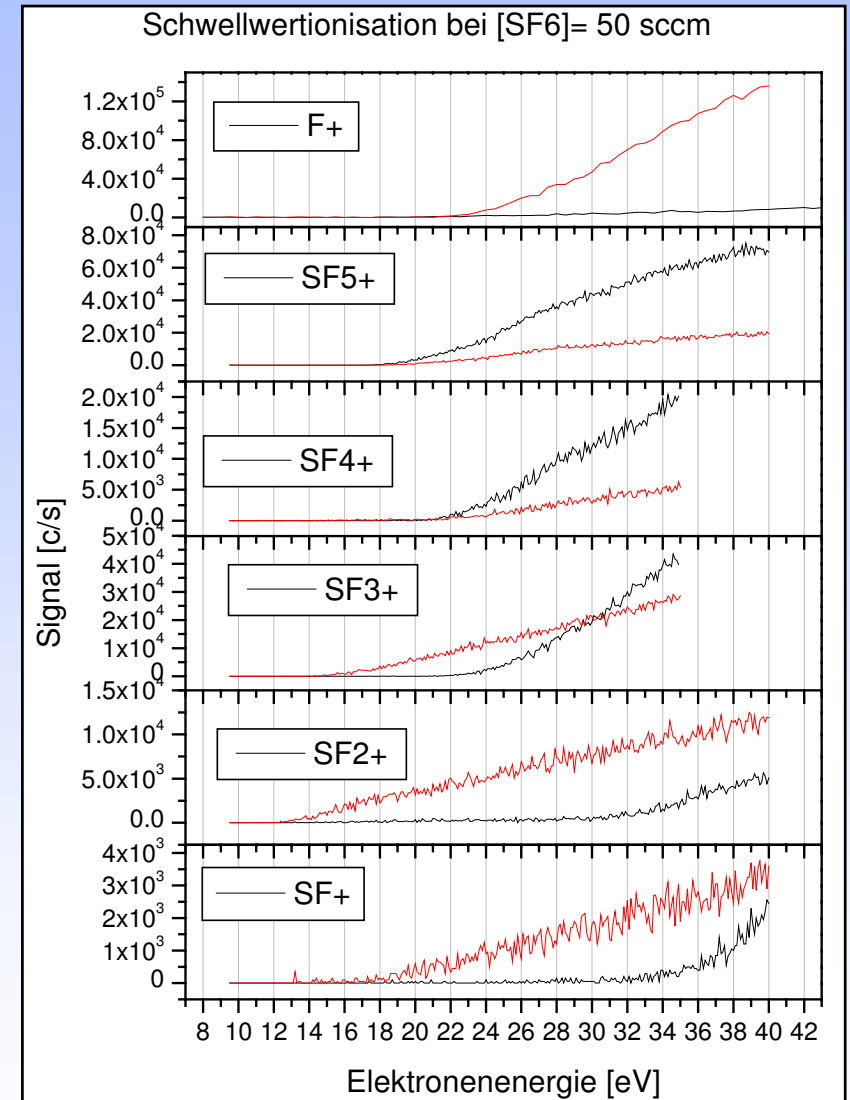
Auftrittspotential-MS (APMS)

Identifizierte Spezies

Korr. Ionisations-schwelle [eV]	Gemessene Ionisations-schwelle [eV]	Ionisations-schwelle aus der Literatur [eV]	Spezies	Parent-Radikal
15	15,5	15,5	SF ₅ ⁺	SF ₆
17,5	18,5	18,5	SF ₄ ⁺	SF ₆
11,5	11,4	11,4	SF ₃ ⁺	SF ₃
8	10,08	10,08	SF ₂ ⁺	SF ₂
14	14,7	14,7	SF ⁺	SF
21	16,5	16,5	F ⁺	F

(Literaturdaten haben Fehler bis zu +/-2 eV)

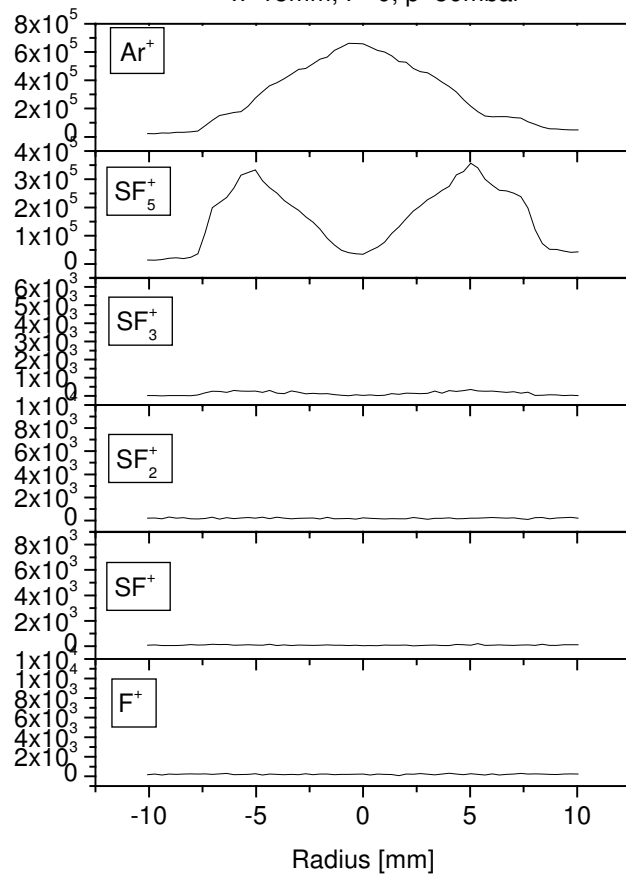
Christophorou, Olthoff, J. Phys. Chem. Ref. Data 29, 292(2000)



Radiale Detektion von Radikalen

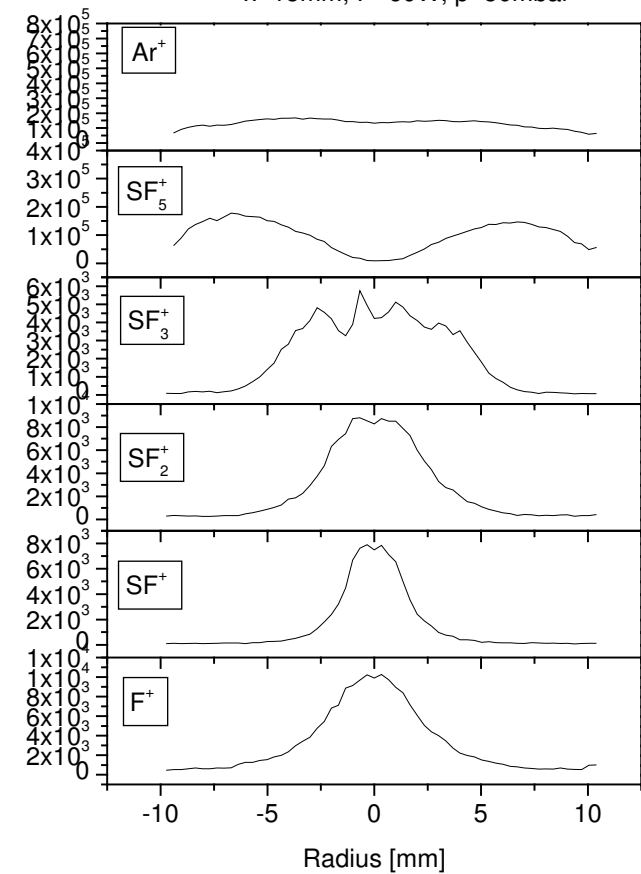
Plasma aus

Radiale Profile bei Plasma off
x=15mm, P=0, p=50mbar

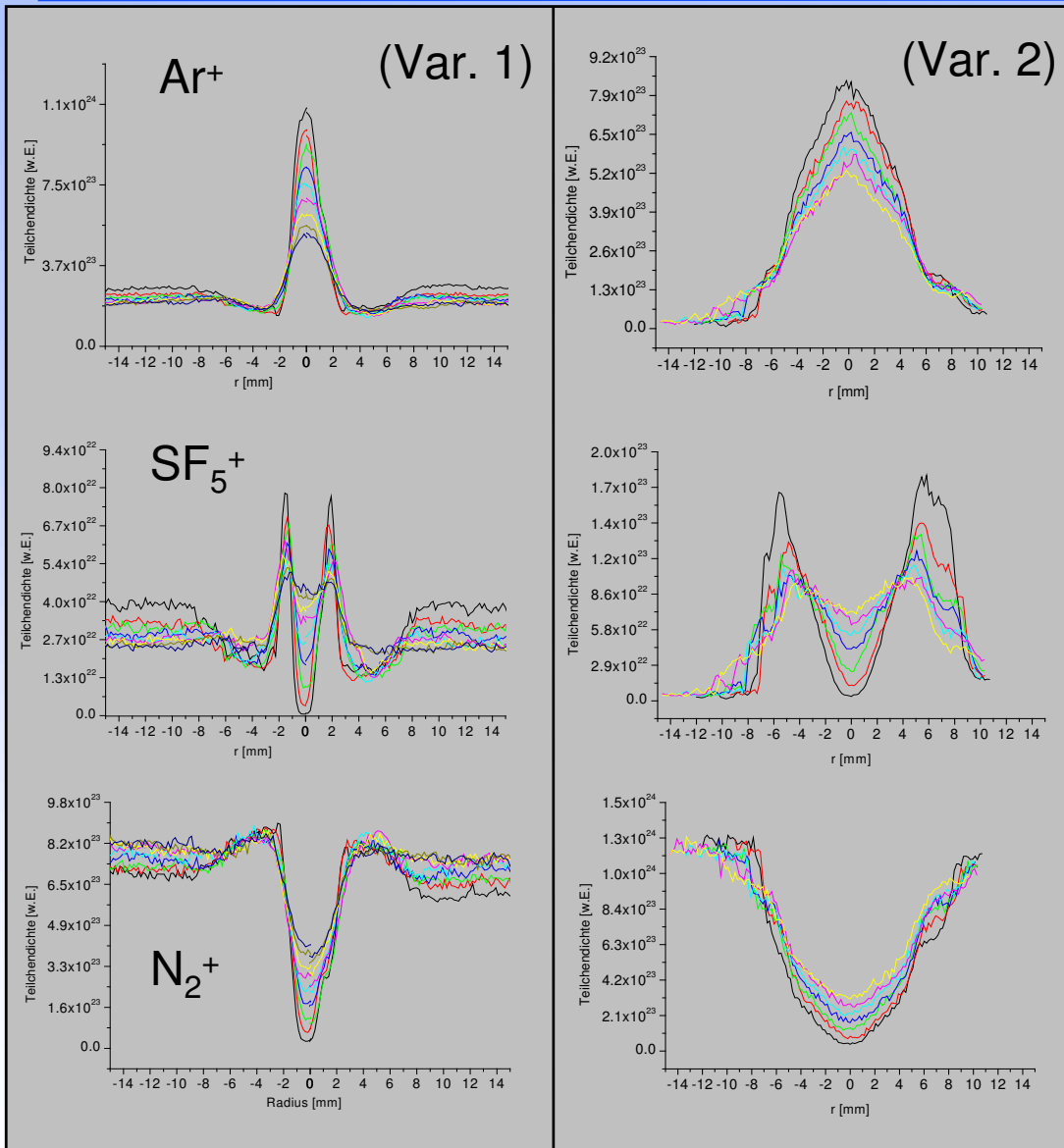


Plasma an

Radiale Profile bei Plasma on
x=15mm, P=60W, p=50mbar

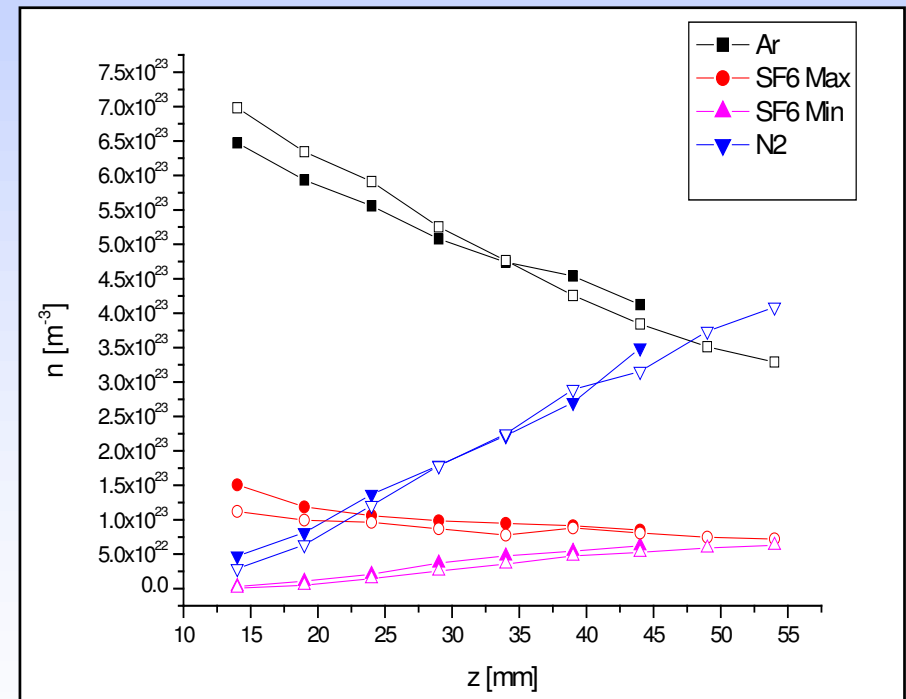


Radiale Gasdichteprofile (Variante 1&2) ohne Plasma

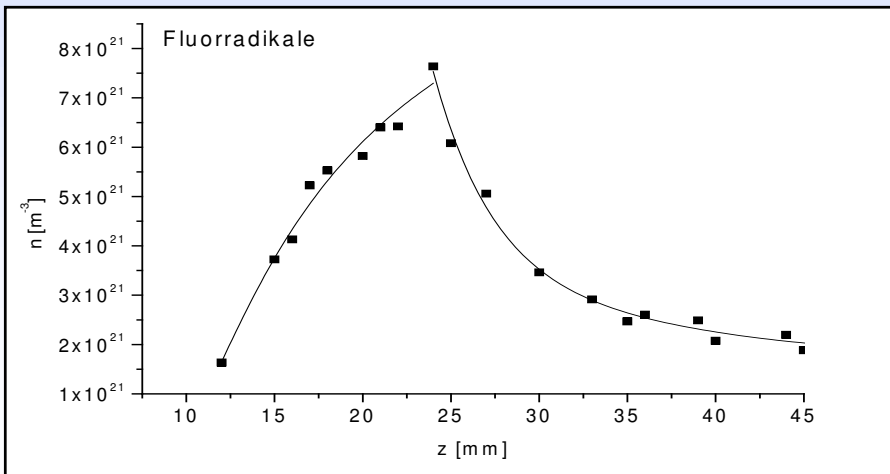
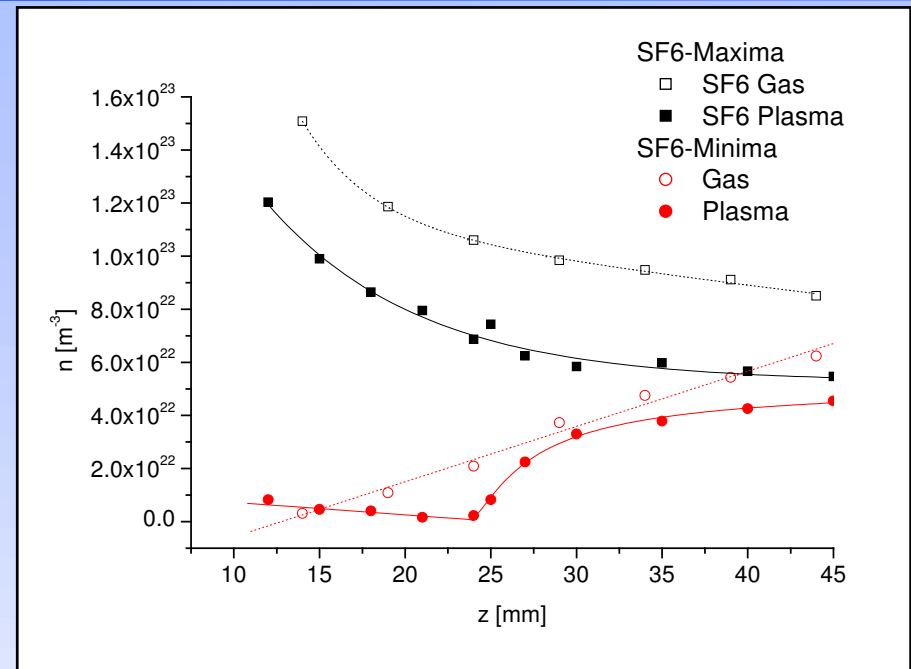
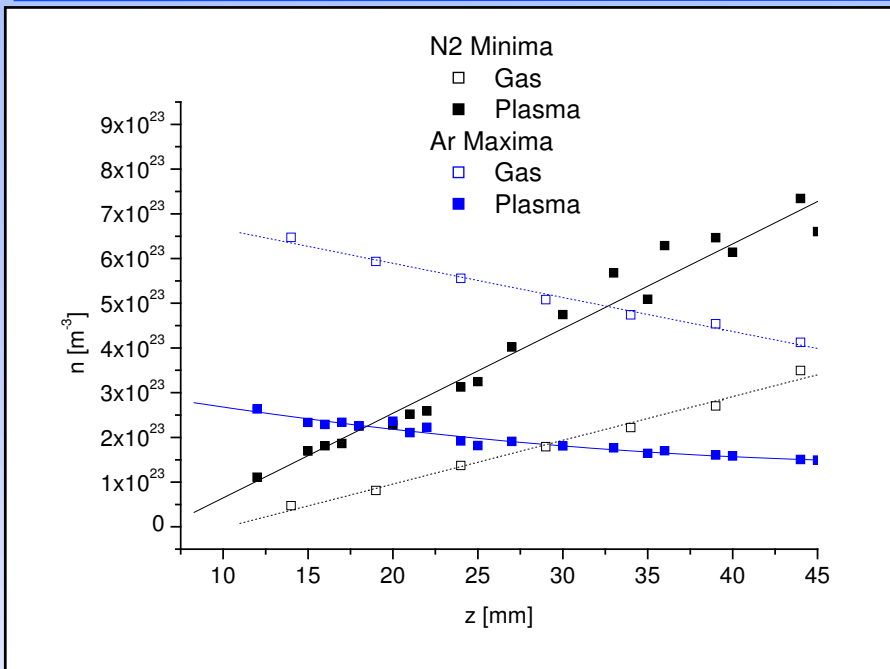


Verbreiterung der radialen Profile bei 2. Meßvariante um ca. Faktor 3

Relative Maximal- und Minimalwerte bleiben gleich

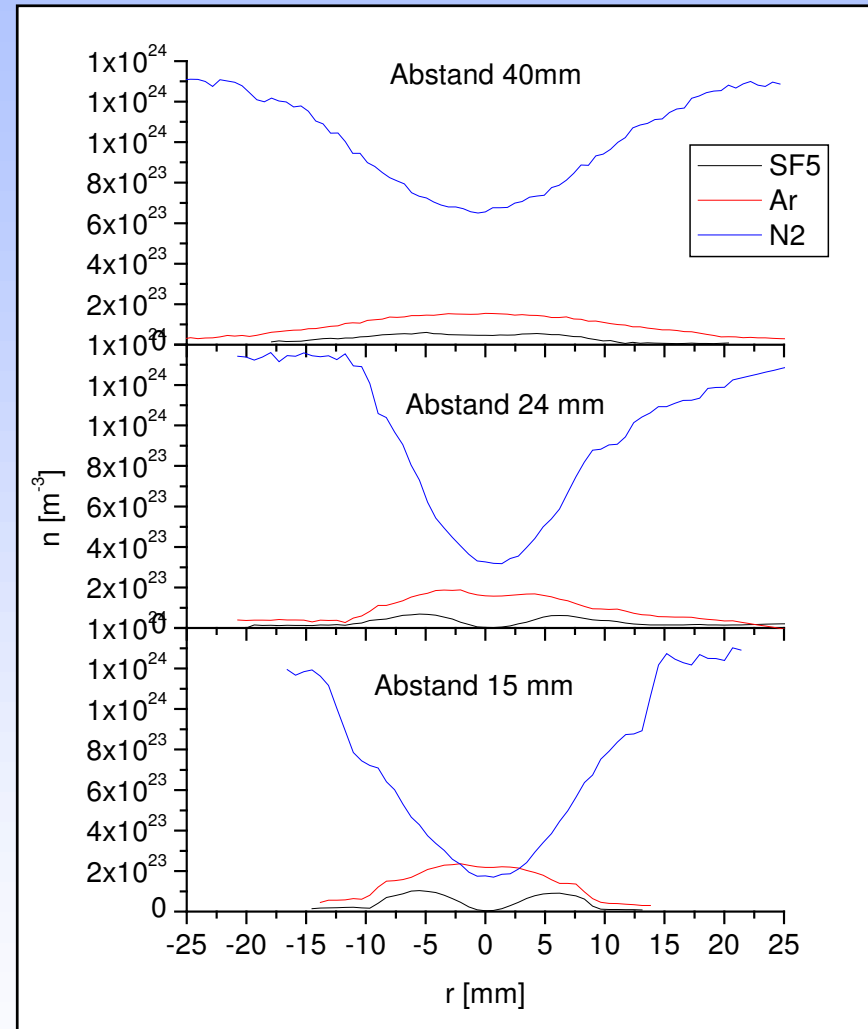
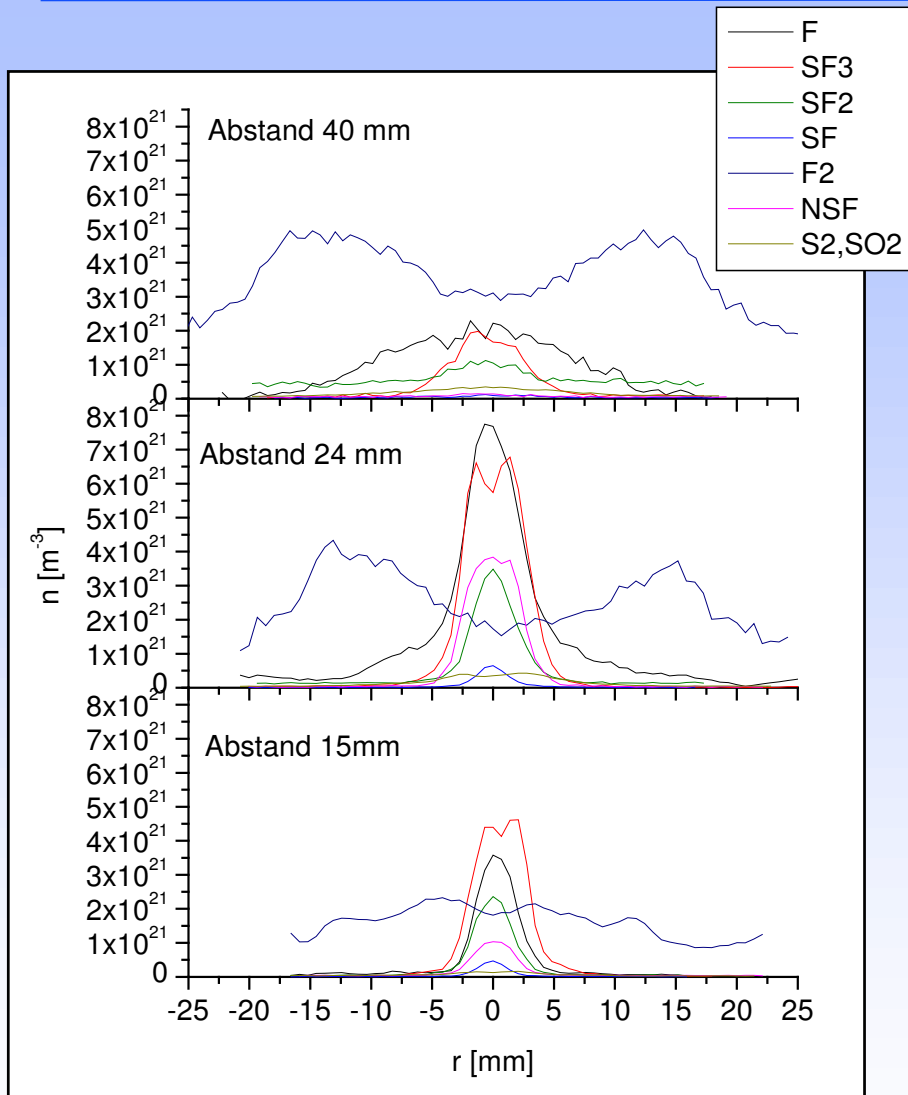


Abstandsabhängigkeit der Teilchendichten bei gezünd. Plasma



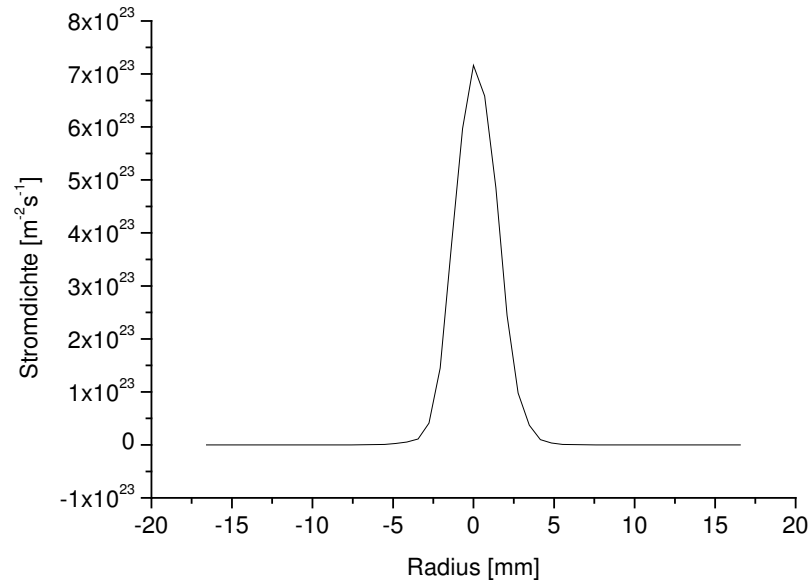
- Aktive Plasmazone bis $z = 25$ mm
- Verringerung der Teilchenkonzentrationen wg. höherer Temperatur
- bei $r=0$: $T = 700..750$ K
- bei $r=6$: $T = 400..450$ K

Radiale Teilchendichteverteilung



Fluoratomdichte

Radiales Fluoratomdichteprofil



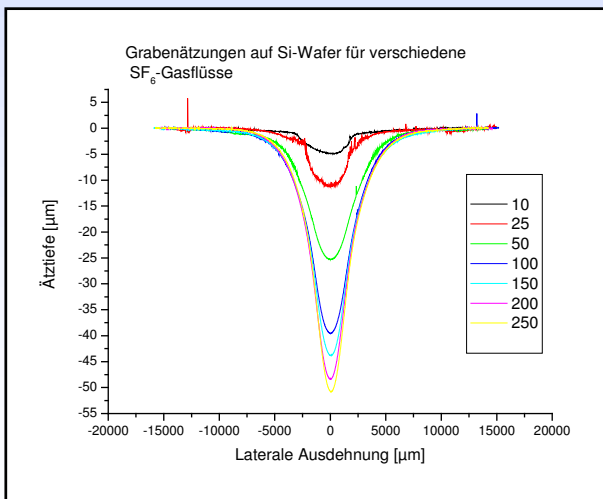
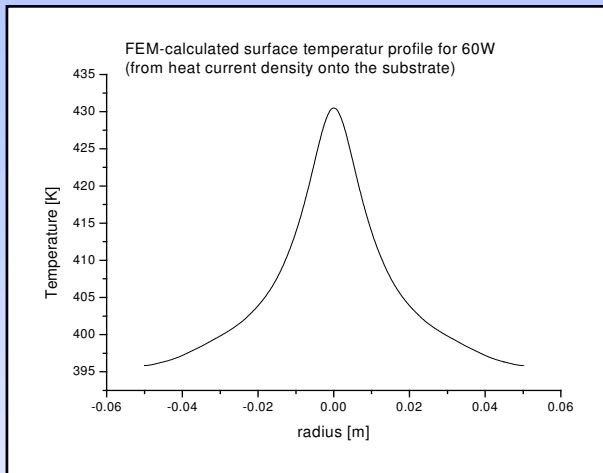
- mit berechnetem Geschwindigkeitsprofil und Fluoratomdichteprofil kann Stromdichteprofil berechnet werden.

$$j(r) = n(r) v(r) \quad (\text{für } v_{\max}=200 \text{ m/s})$$

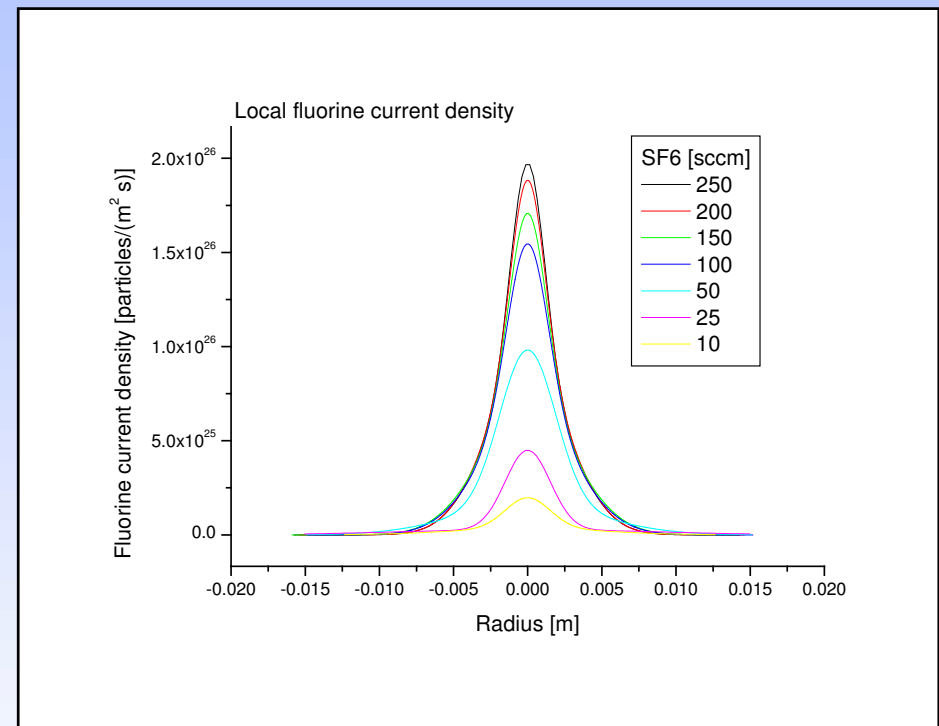
$$j(r) = 7.16 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$$

Abtragsprofil und radiale Fluorstromdichte

Ätzprofil und Oberflächentemperatur auf einem Si-Wafer



Stromdichteprofile von F+F⁻ Radikalen, berechnet aus Tiefenprofil und OF-Temperatur

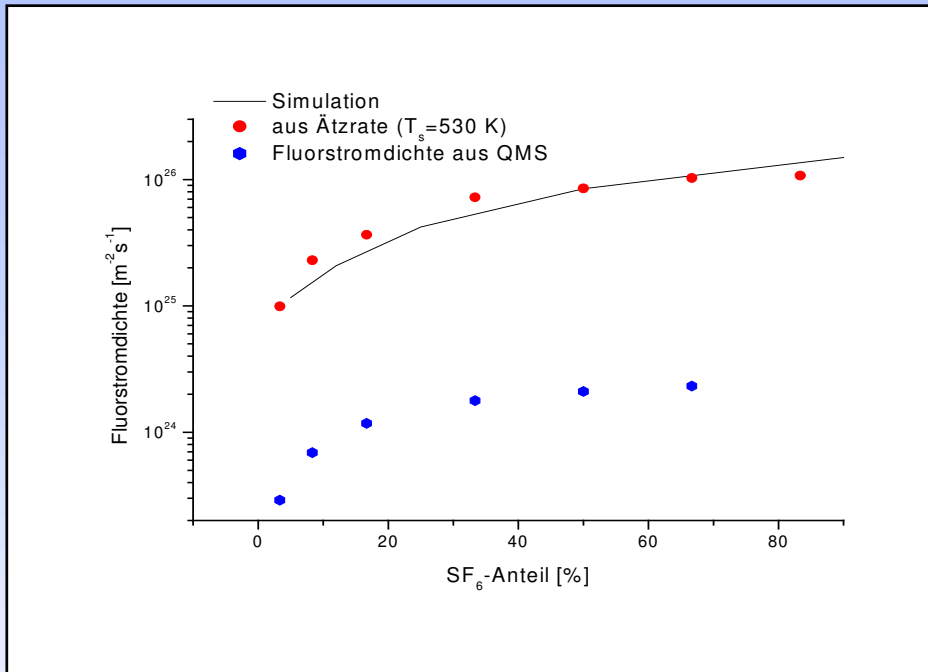


Tiefenprofil:

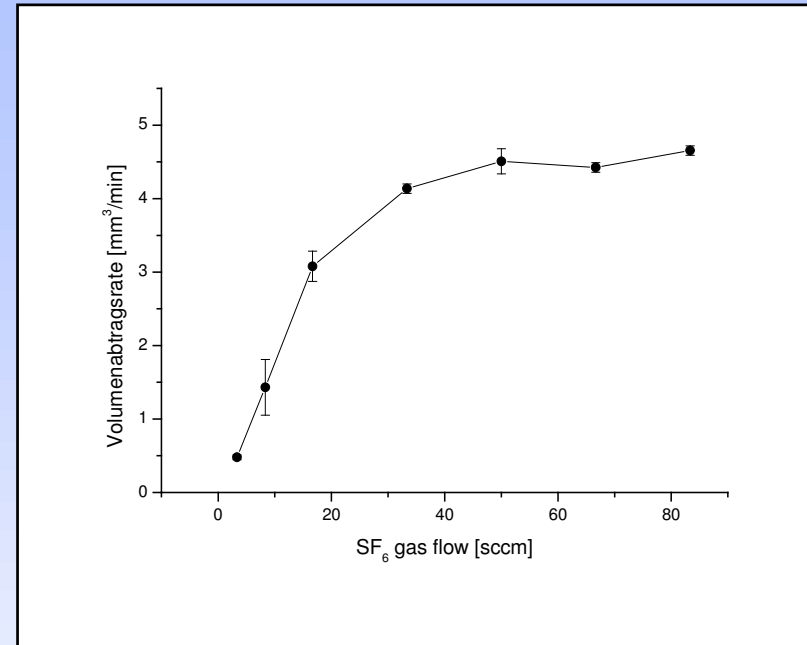
$$D(r, t) = \left[\left(\frac{M_{Si}}{N_A \rho_{Si}} \right) \cdot 60 \right] \cdot \left[0.25 j_{F+F^-}(r) \right] \cdot \left[n_{Si} P_0 \exp \left\{ \frac{-E_a}{kT_{OF}(r, t)} \right\} \right]$$

Fluorstromdichte

Stromdichte aus Simulation und Messung



Volumenabtragsrate



- Aus Ätzraten bestimmte maximale Fluorstromdichte stimmt mit theoretische berechneter gut überein
- max. Fluorstromdichte $j = n v$ aus QMS Messung um ca. Faktor 35 kleiner

Ursachen für Diskrepanz:

- v-Profil an OF komplizierter (Staupunkt)
- F-Verlustreaktionen im QMS
- OF-Teilchendichten anders bei Si-Substrat
- zusätzliche Ätzreaktionen

Zusammenfassung

Kalibrierung der Massenspektrometersignale

Ortsaufgelöste quantitative Massenspektrometrie, Nachweis von Radikalen

Bestimmung von Abtragsprofilen daraus folgen Fluorstromdichteprofile

Vergleich mit berechneten und aus QMS-Messungen ermittelten Fluorstromdichten

Ausblick

Massenspektrometrische Untersuchungen:

- Lokal aufgelöste Spezieskonzentrationen bzw. -flüsse aus dem Plasma in Abhängigkeit von Prozeßparametern: Druck, Leistung
- Detektion von Abtragsprodukten, lokale Redeposition auf dem Substrat
- Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit plasmachemischer und strömungsmechanischer Modellierung