

Projekt: Simulation von Spinprozesstechnologien. 3. Teil / Kurzbericht:

Effekte zufolge gekrümmter Geschwindigkeitsprofile im zentrischen Strahl

Dieser Bericht dient als **Ergänzung zum 2. Kurzbericht** und soll helfen, die beim letzten Meeting mit Herrn Baldy / SEZ noch als offen deklarierten Punkte zu klären.

1. Einfluss der inneren Reibung auf die Geschwindigkeitsverteilung im Freistrah

Der von Herrn Dr. Kaczynski / CTR aufgebrachte und kurz erörterte Einwand, dass ein parabolisches Geschwindigkeitsprofil bereits nach geringer Fallhöhe unter Einfluß der Zähigkeit vergleichmäßig werde, kann für den hier betrachteten **laminaren Strahl** entkräftet werden:

Die von mir durchgeführte Untersuchung zeigt, daß der Reibungseinfluss zufolge der nahezu verschwindenden Schubspannung durch deren Kopplung an die der mitgerissenen Umgebungsluft auf eine dünne Randschicht beschränkt bleibt, wenn das Verhältnis ϵ der die Strömung (im Wesentlichen) beschreibenden dimensionslosen Kenngrößen Strahl-Reynoldszahl Re und Galileizahl Ga hinreichend klein ist:

$$Re = \frac{\tilde{U}\tilde{a}}{\tilde{\nu}}, \quad Ga = \frac{\tilde{a}^3\tilde{g}}{\tilde{\nu}^2}, \quad \epsilon = \frac{Re}{Ga} \ll 1. \quad (1)$$

Hier bezeichnen \tilde{a} den Strahlradius, \tilde{g} die Schwerebeschleunigung, $\tilde{\nu}$ die (temperaturabhängige) kinematische Zähigkeit der Flüssigkeit, sowie \tilde{U} die über den Querschnitt gemittelte Strömungsgeschwindigkeit (zur Erläuterung s. auch den 2. Kurzericht). Die Größe ϵ drückt dann das Verhältnis von Zähigkeits- zu Schwerkrafteinfluß aus. (Es sei darauf hingewiesen, dass *nicht*, wie man etwa vermuten würde, die Bedingung $Re \gg 1$ die Strömung im Strahl als reibungsfrei charakterisiert!) Tatsächlich ergibt sich für den betreffenden Parameterbereich

$$Re \approx 3.7 \times 10^3, \quad Ga \approx 8.0 \times 10^4, \quad \epsilon \approx 0.046. \quad (2)$$

Die Dicke $\tilde{\delta}$ der zähen Randschicht wird weiters durch

$$\tilde{\delta} \sim \sqrt{\frac{\tilde{U}\tilde{\nu}}{\tilde{g}}}, \quad (3)$$

und damit vermöge der Größenordnungs-Relation

$$\frac{\tilde{\delta}}{\tilde{a}} \sim \sqrt{\epsilon} \approx 0.215, \quad (4)$$

abgeschätzt. Sie umfaßt also **etwa 21...22%** des **Strahlradius**, und zwar, aus Gründen der Kontinuität, **unabhängig** von

- der Fallhöhe,
- des konkreten Geschwindigkeitsprofils am Düsenaustritt! Bedeutet weiters \tilde{x} die Entfernung von der Düse, schrumpft sie bei Annäherung an die Düse proportional zu $\sqrt{\tilde{x}}$ auf Null.

2. Ergänzung zur Fallstudie: Parabelförmige Geschwindigkeitsverteilung im Strahl

Die Verzerrung des parabelförmigen Strahlprofils durch die Strahlumlenkung wird anhand Abbildung 1 veranschaulicht.

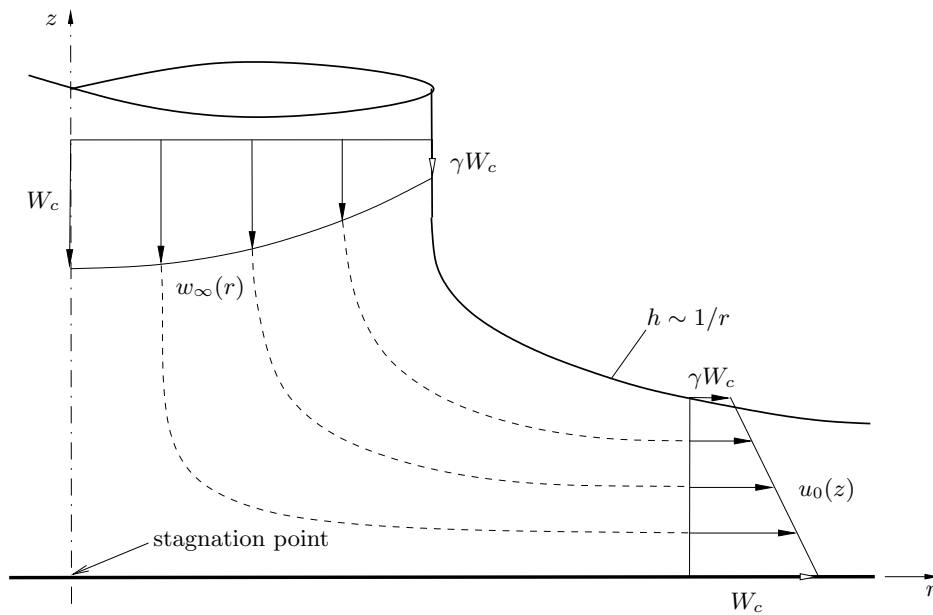
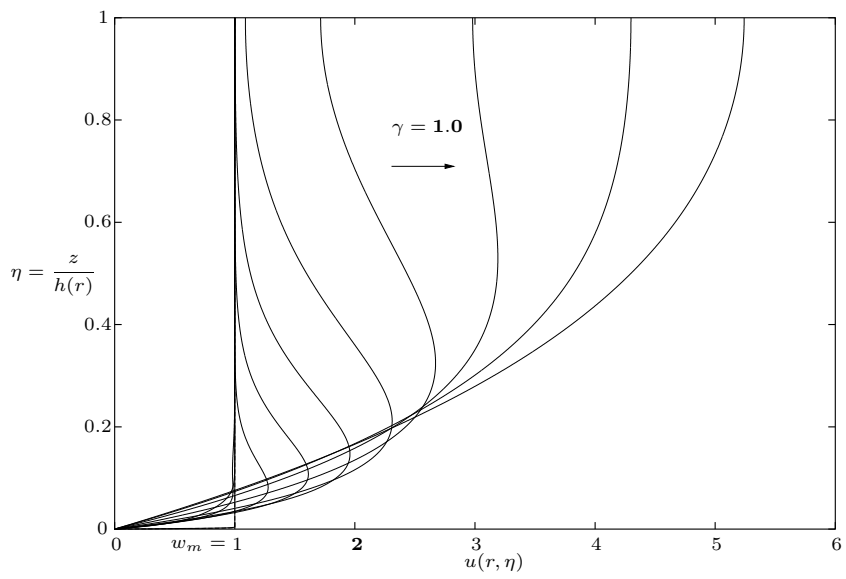
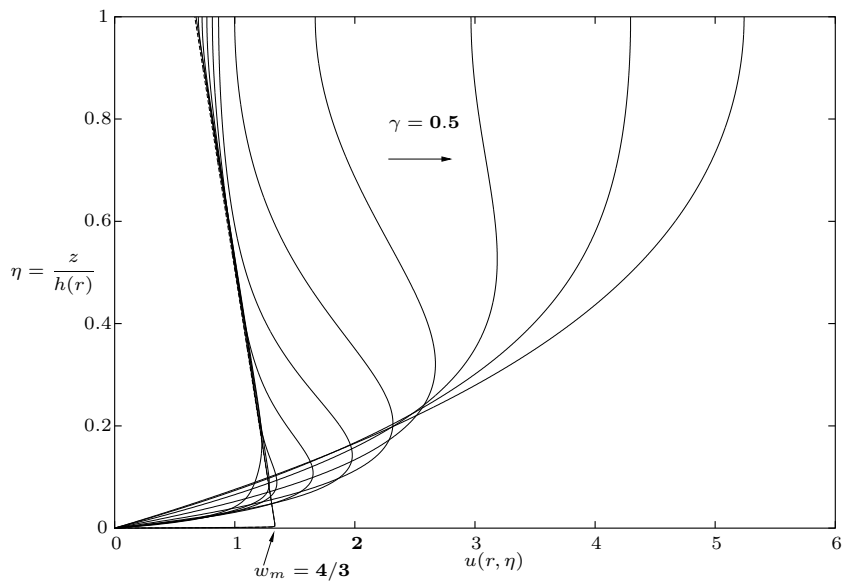
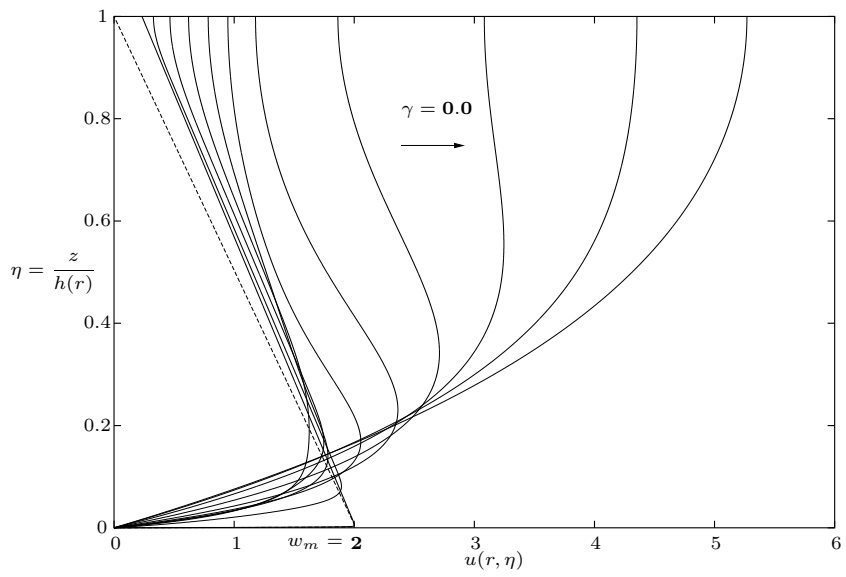


Abbildung 1: **Reibungsfreie** Strahlumlenkung.

Die im 2. Kurzbericht präsentierten radialen Geschwindigkeitsverteilungen für $\gamma = 0.0$, $\gamma = 0.5$, $\gamma = 1.0$ werden umseitig erneut dargestellt. Die Bezeichnungen im Diagramm werden aus dem 2. bzw. 1. Kurzbericht unverändert übernommen:

Die keilförmigen Anfangsverteilungen unmittelbar nach der Strahlumlenkung sind strichliert geplottet, die folgenden Profile jeweils für

$\tilde{r} \approx 0.410, 0.820, 1.230, 1.639, 2.049, 2.459, 2.869, 3.279, 3.688, 4.098$ cm (hier: **physikalischer Radius!**) aufgetragen, wobei die Profile für größere Radien weiter nach rechts reichen (Pfeilrichtung!). Der Waferradius beträgt 15 cm. **Fazit: Die Geschwindigkeitserhöhung findet ca. innerhalb 1/4 des Waferradius statt!**



3. Gegenüberstellung: Achsensymmetrische Beaufschlagung – *Boomspring*-Verfahren

Die Behandlung des instationären 3D-Problems (*Boomspring*) auf Basis einer Flachwasser-Approximation scheint prinzipiell möglich, der Zeitaufwand liegt jedoch bei ca. **8-12 Monaten**. Große Schwierigkeiten werden im Bereich der Anpassung der filmartigen Lösung an das äußerst komplexe Strömungsfeld des exzentrisch und pendelnd auftreffenden Strahles erwartet. Ein ungefährender Zeitplan wird, wie vereinbart, von Prof. Kluwick und mir bis nächste Woche ausgearbeitet.

Unabhängig von dieser Planung weisen wir jedoch darauf hin, dass aus unserer Sicht **keine nennenswerten Erkenntnisse in Bezug auf chemische Reaktionen** alleine aus der topologisch sehr komplizierten, instationären Strömung zu erwarten sind. Außerdem sind die bereits bestehenden, nach der Projektübernahme meinerseits gewonnenen Einsichten, deren **wissenschaftlicher Neuigkeitswert**, v. a. auch in Hinblick auf die Untersuchung von Ablösephänomenen, **als sehr hoch einzustufen ist**, auf die dreidimensionale Problemstellung nur bedingt anwendbar. Deswegen wollen wir Herrn Dr. Deutschmann / SEZ hier nochmals die unserer Meinung nach sinnvolle Erweiterung des zur Zeit existierenden achsensymmetrischen Modelles anhand der folgenden Punkte vorschlagen. Dabei möchten wir auf das unserer Meinung nach vorhandene Potential der 2D-Strömungskonfiguration bei achsialer Beaufschlagung in Hinblick auf eine **Optimierung** der vorhandenen Parameter zur **Erreichung einer örtlich gleichmäßigen Ätzrate** hinweisen.

Vorteile bei Radialsymmetrie aus strömungsmechanischer Sichtweise:

- rationale Behandlung: analytisch/numerische Vorhersage von Strömungs- **und** Konzentrationsfeld (für einfache Modellreaktion) bei **geringstmöglicher** Anzahl dimensionsloser Parameter möglich \Rightarrow übersichtliche Darstellung der Lösung;
- Gut kontrollierbares, da stationäres Strömungsfeld \Rightarrow Wie gezeigt, wird eine gezielte Beeinflussung der Strömung durch Generierung einer entsprechenden Geschwindigkeitsverteilung im auftreffenden Strahl ermöglicht: Dabei wird im Optimalfall (Annahme eines parabelförmiges Strahlprofils) die Radialgeschwindigkeit in Nähe der Waferoberfläche **ca. um den Faktor 2 im Bereich des ersten Viertel des Waferradius** unabhängig von **Volumenstrom, Drehzahl und Temperatur** im Gegensatz zum Fall des gleichförmigen Strahlprofils erhöht!
- Der dadurch verstärkte konvektive, radiale Transportmechanismus kann zum Abbau der unerwünscht hohen Konzentrationen in Strahlnähe genutzt werden.

Eine Untersuchung der chemischen/diffusiven Vorgänge sowie deren **mit relativ geringem Aufwand** denkbare Miteinbeziehung in das bestehende numerische Modell könnte die Möglichkeit einer **Vergleichmäßigung der Ätzrate** entlang des Waferradius bestätigen sowie zu deren Optimierung dienen. Diese Vermutung basiert auf folgendem (hier stark vereinfacht dargestellten) Mechanismus unter der Annahme einer

- stark exothermen Gesamtreaktion und
- eines relativ kalten Strahles:

Die starke Konvektion in Zentrumsnähe hat eine kühlende Wirkung, wodurch der Effekt zur Verringerung der hohen Konzentrationen verstärkt wird (s. o.). Der Abtransport der hohen Reaktionsenthalpie, welche aufgrund der relativ hohen Konzentration in Strahlnähe in das Strömungsfeld eingetragen wird, gewährleistet eine radiale Temperaturzunahme und damit eine höhere Reaktionsrate im Außenbereich des Wafers; m. a. W.:

Der in radialer Richtung negative Konzentrationsgradient wird durch den positiven Temperaturgradienten kompensiert.

Dieser Effekt wird noch den verbesserten konvektiven Transport aufgrund der **steigenden Wandschubspannung** für zunehmenden Radius (analytische Lösung im Außenbereich des Wafers vorhanden!) verstärkt.

Dadurch wird das Ziel einer an der gesamten Waferoberfläche gleichmäßigen Abtrage – zumindest näherungsweise – systematisch erreicht. Daß die Reaktionen wahrscheinlich vornehmlich heterogen, d.h. innerhalb einer dünnen Reaktions-Grenzschicht unmittelbar an der Oberfläche ablaufen, lässt eine starke Vereinfachung ihrer Behandlung unter Zuhilfenahme semi-analytischer Methoden (und damit eine anschauliche Darstellung der Lösung in Abhängigkeit weniger Parameter) erwarten.

- Auftreten von unerwünschten geschlossenen Ablösegebieten (Schwerkrafteinfluß bzw. Existenz eines Wassersprunges bei geringen Drehzahlen) kann durch geeignete Parameterwahl (Rossby-Zahl) gezielt verhindert werden: Wassersprung, d. h. Ablösung wird bei zunehmender Drehzahl an den Rand und damit aus dem Waferbereich gedrängt;

- Die hier genannten chemischen Aspekte sind aufgrund der Komplexität des Strömungsfeldes im instationären und dreidimensionalen Fall in systematischer und rationaler Weise mit vertretbarem Aufwand in absehbarer Zeit sicher nicht erfassbar. In diesem Zusammenhang möchten wir auf die bisher nicht überwundenen Schwierigkeiten, die bei der Anwendung kommerzieller Navier-Stokes-Solver (wie FLUENT) auf ein derart komplexes Problem entstehen, hinweisen.

Fazit: Je nachdem, ob die angesprochene Optimierung sich als machbar oder auch nicht verwirklicht herausstellt, kann eine solche Analyse die Notwendigkeit des *Booms* eventuell in Frage stellen bzw. herausstreichen!

In jedem Fall scheint ihre Untersuchung sinnvoll – eben auch in Hinblick auf eine möglicherweise erst danach anschließende Behandlung des 3D-Problems.

Wir bitten Herrn Dr. Deutschmann / SEZ um eine (möglichst rasche) Stellungnahme aus seiner Sicht zu den dargelegten Optionen!

Adresse: DR. BERNHARD SCHEICHL,

TU Wien, Institut für Strömungslehre und Wärmeübertragung / Abteilung für Aerodynamik und Wellenausbreitung, Resselgasse 3/1/3, A-1040 Wien.

e-mail: bscheich@post.fluid.tuwien.ac.at

Tel.: ++43 +1 58801 322 25