

Kurzfassung der Dissertation

Name des Kandidaten: Christian Cupak

Name der Prüfer: Friedrich Aumayr (TU Wien), Paul Scheier (Universität Innsbruck)

Titel: Experimental and numerical study of ion-induced sputtering for first wall materials in nuclear fusion devices

Kurzfassung:

Der kontinuierlich steigende Primärenergiebedarf der Menschheit und die gleichzeitig heute schon gut erkennbaren und evidenten Auswirkungen der CO₂-Emissionen auf das Klima der Erde motivieren kontinuierliche Bemühungen, neue Formen von nachhaltiger, aber auch ertragreicher Energieversorgung zu erschließen und großtechnisch umzusetzen. Ein prominentes Beispiel für solche Entwicklungen ist die Kernfusionstechnologie, mit dem Ziel der kontrollierten Energieversorgung. Bis zur Realisierung des ersten Kernfusionskraftwerks sind derzeit noch einige technische Hindernisse zu überwinden. Ein Beispiel ist die Auswahl geeigneter Wandmaterialien für die Innenauskleidung des Reaktorbehälters, wobei auch die Vorhersage von Materialeigenschaften unter Plasmaexposition wichtig ist.

Diese Arbeit leistet einen Beitrag zum entsprechenden Gebiet der Plasma-Wand Wechselwirkung, wo unter anderem die atomare Erosion von Materialien durch Ionenbeschuss untersucht wird. Dieser Prozess, der als Zerstäuben bezeichnet wird, kann die Lebensdauer der dem Plasma ausgesetzten Materialien begrenzen und einen unvorteilhaften Anstieg der Verunreinigungskonzentration im Fusionsplasma verursachen. Daher ist eine zuverlässige Vorhersage der Zerstäubungseigenschaften, die auch Parameter wie die Zerstäubungsausbeute umfasst, wünschenswert.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden sowohl Experimente als auch numerische Simulationen durchgeführt. Auf der experimentellen Seite wurde eine hochempfindliche Quarzkristall-Mikrowaage in Kombination mit einer Ionenquelle verwendet, die einen gut definierten Ionenstrahl erzeugte. Mit diesem Aufbau konnten genaue Daten über die Zerstäubungsausbeute unter ausgewählten Laborbedingungen gemessen werden. Für numerische Simulationen wurden sowohl bekannte Codes basierend auf der sogenannten "binary collision approximation" verwendet, als auch ein neuer ray-tracing-Code namens SPRAY entwickelt. Mithilfe dieser experimentellen und numerischen Werkzeuge bestand das Hauptziel dieser Doktoratsarbeit, die Effekte während der atomaren Zerstäubung für verschiedene Randbedingungen zu untersuchen. Im Zuge dieser Arbeit werden drei ausgewählte Studien im Detail vorgestellt.

In der ersten präsentierten Studie wurden sowohl experimentelle als auch numerische Ansätze verwendet, um die Auswirkung von konventioneller Oberflächenrauigkeit auf W bezüglich der Zerstäubung während Ar⁺-Bestrahlung zu untersuchen. Dabei konnte validiert werden, dass der neu entwickelte SPRAY-Code ein praktikables und schnelles numerisches Werkzeug für solche Untersuchungen ist. Darüber hinaus wurde ein neuer Oberflächenrauigkeitsparameter, der skalenunabhängige mittlere Neigungswinkel δ_m der Oberfläche, als zuverlässige statistische Metrik zur Beschreibung der Zerstäubungsausbeute von konventionell rauen Oberflächen identifiziert. Die Verwendung üblicher skalenabhängiger Parameter wie der RMS-Rauheit versagte in dieser Hinsicht. Es wurde sogar eine empirische Fit-Formel für die Vorhersage der Zerstäubungsausbeute von rauen W -Oberflächen ermittelt, die nur den Ioneneinfallswinkel, den Rauheitsparameter δ_m und die Zerstäubungsausbeute für eine flache W -Oberfläche unter normalem Ioneneinfall benötigt.

Die zweite in dieser Arbeit vorgestellte Studie befasst sich schließlich mit der gezielten Nanostrukturierung von W und den daraus resultierenden Auswirkungen auf die Zerstäubungsausbeute. Bei der Verwendung von nano-säulenförmigen W -Oberflächen anstelle von flachem W konnte sowohl in Experimenten als auch mit SPRAY-Simulationen eine vorteilhafte

Reduzierung der Zerstäubungsausbeute und eine Verringerung der Abhängigkeit vom Ioneneinfallswinkel beobachtet werden. Weitere numerische Optimierungsstudien ermöglichten die Identifizierung einer spezifischen geometrischen Konfiguration, die eine sehr starke Verringerung der Zerstäubungsausbeute um mehr als 80% im Vergleich zu flachen W-Oberflächen bewirkte. Mit Hilfe von dynamischen Simulationen unter Verwendung des SDTrimSP-3D-Codes wurde auch das Erosionsverhalten als Funktion der Fluenz für diese nanostrukturierten Oberflächen untersucht, was erste Vorhersagen hinsichtlich des Potenzials für die Anwendung auf plasma-zugewandten Komponenten in einem Fusionsreaktor ermöglichte.

In der dritten vorgestellten Studie wurde der Einfluss von gemischter Ionenbestrahlung auf die Zerstäubung von flachem W mit 2 keV Ar^+ und D_2^+ experimentell untersucht, um zu prüfen, ob synergistische Effekte zu beobachten sind. Das Ergebnis war, dass die Zerstäubungsausbeute bei gemischter Bestrahlung mit Hilfe eines Superpositionsansatzes, welcher auf den individuellen Fluenzen der Ionensorten basiert, gut vorhergesagt werden kann. Dieses Ergebnis untermauert die Annahme, dass in dem untersuchten Parameterbereich keine synergistischen Effekte zu erwarten sind, was die Verwendung der binary collision approximation in numerischen Simulationscodes weiter unterstützt.