



Entwicklung eines Werkzeugs zur Modellierung der Nettoerosion im Hauptraum der Brennkammer eines Tokamaks und Studium der Plasma-Wand-Wechselwirkung an DEMO1

Mitja Beckers

Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 414

ISBN 978-3-95806-307-5

Forschungszentrum Jülich GmbH
Institut für Energie- und Klimaforschung
Plasmaphysik (IEK-4)

Entwicklung eines Werkzeugs zur Modellierung der Nettoerosion im Hauptraum der Brennkammer eines Tokamaks und Studium der Plasma-Wand-Wechselwirkung an DEMO1

Mitja Beckers

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 414

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-95806-307-5

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Codes zur Randschichtmodellierung in Kernfusionsplasmen	7
2.1. Integrierte Systemmodellierung	8
2.2. Entwicklung des CELLSOR-Codes	9
2.2.1. Schnittstellen zwischen CELLSOR und Systemcodes	9
2.2.2. Entwicklungsschritte	10
2.3. CELLSOR-Studien zur Analyse der Wanderosion an DEMO1	10
3. Grundlagen	11
3.1. Kernfusion	11
3.1.1. Deuterium-Tritium-Reaktion	11
3.2. Plasmaphysik	12
3.2.1. Debye-Länge	13
3.2.2. Formierung der Debye-Schicht	13
3.2.3. Magnetische Vorschicht	13
3.2.4. Bohm-Kriterium	14
3.2.5. Mach-Zahl	14
3.2.6. Stoßprozesse	15
3.2.7. Transport	16
3.2.8. Betriebsmodi und -grenzen in Tokamak-Plasmen	18
3.3. Tokamak	21
3.3.1. Plasmaheizung	21
3.3.2. Geometrisches Prinzip	22
3.3.3. Flussflächengeometrie	23
3.3.4. Divertor	25
3.3.5. Radialer Aufbau	26
3.3.6. Tritium-Brutrate	27
3.4. Plasma-Wand-Wechselwirkung	28
3.4.1. Zerstäubung	28
3.4.2. Einfallswinkel beim Wandaufprall	29
3.4.3. Co- und Redeposition	30
3.4.4. Erste Wand im Hauptraum der Brennkammer	30
3.5. DEMO1-Designparameter	32
3.5.1. Betriebsfenster	33
4. Modellierung der Plasma-Wand-Wechselwirkung im Hauptraum der Brennkammer	35
4.1. Plasmabeschreibung	36
4.2. Schädigung durch Neutralteilchen: der Monte Carlo Code CELLSOR	37
4.2.1. Geometrie	37
4.2.2. Wechselwirkungen zwischen Testteilchen und Hintergrundplasma	44
4.2.3. Gewichtung von Testteilchen	48
4.2.4. Konstruktion der Testteilchenquelle	48
4.2.5. Neutralteilchendichte	52
4.2.6. Zerstäubungsausbeuten	53

4.2.7.	Statistik	53
4.2.8.	Neutralen-Abschirmung	53
4.2.9.	Zusammenfassung	54
4.3.	Schädigung durch Ionen	55
4.3.1.	Beschleunigung im elektrischen Feld der Debye-Schicht	55
4.3.2.	Ionisationsgrad und Konzentration verschiedener Ionensorten	56
4.3.3.	Wandzufluss der Brennstoff- und Verunreinigungsionen	57
4.3.4.	Zerstäubungsausbeuten	57
4.4.	Trajektorien erodierter Wandatome: der Monte Carlo Code CELLSOR ERO	58
4.4.1.	Konstruktion der Testteilchenquelle	58
4.4.2.	Wechselwirkungen zwischen Testteilchen und Hintergrundplasma	60
4.4.3.	Berechnung der prompten Redeposition	61
4.4.4.	Wolframatomdichte	61
4.4.5.	Selbsterstäubung durch $W^+ \rightarrow W$	62
4.5.	Teilchenbilanz im <i>Scrape-Off-Layer</i> (SOL)	62
4.5.1.	Analytische Lösung der Kontinuitätsgleichung im Scrape-Off-Layer	63
4.5.2.	Iterationsschema und Konvergenzkriterium	64
4.5.3.	Berechnung des Ionenflusses zur Wand	65
4.6.	Teilchenbilanz zwischen Hauptplasma und Scrape-Off-Layer	66
4.6.1.	Bestimmung der stationären Heliumkonzentration im Kernplasma	66
4.6.2.	Bestimmung des Teilchenzuflusses der externen Brennstoffzufuhr	67
4.7.	Ausblick für zukünftige Weiterentwicklungen	68
5.	Benchmark-Rechnungen der Codes CELLSOR und EIRENE	69
5.1.	Vergleichsrechnungen mit dem validierten Monte-Carlo-Code EIRENE	70
5.1.1.	Modellspezifikationen der EIRENE- und CELLSOR-Rechnungen	70
5.1.2.	Definition der Referenzfälle	71
5.1.3.	Vergleich des Atomdichteprofiles	72
5.2.	Plausibilitätskontrolle: Energie- und Winkelverteilung beim Wandaufprall	76
5.2.1.	Winkelverteilung	76
5.2.2.	Energieverteilung	76
5.3.	Zusammenfassung und Fazit	78
6.	PWW-Studien für den Hauptraum der Brennkammer	80
6.1.	Kriterium zur Bestimmung der Wandlebensdauer	80
6.2.	Elementare Randschichtparameter	80
6.3.	Mechanismen der Wandschädigung	80
6.4.	Externe Brennstoffzufuhr durch Gaseinlass bzw. Pellet-Injektion	81
6.4.1.	In der Randschicht abgepumpter Tritium-Beipass	82
6.4.2.	Auswirkungen auf die Tritium-Brutrate (TBR)	83
6.4.3.	Fazit	84
6.5.	Auswahl der Randschichtparameter	85
6.5.1.	Abschätzung der konvektiven Transportstärke	87
6.5.2.	Profil der Elektronentemperatur	88
6.6.	Routine zur Durchführung der Erosionsstudien	89
6.6.1.	CELLSOR-Rechnung ohne Ionisationsquellen	89
6.6.2.	CELLSOR-Rechnungen mit Ionisationsquellen	90
6.6.3.	Aufstellung der Teilchenbilanz im SOL	90
6.6.4.	Ermittlung der Rate an externer Brennstoffzufuhr	90

6.6.5.	Annahmen für Parameter im Modell der Brennstoffzufuhr	91
6.6.6.	Berechnung der prompten Redeposition	91
6.7.	Diskussion der Ergebnisse der PWW-Studien	92
6.7.1.	Ionendichte im SOL	93
6.7.2.	Variationen des mittleren Wandabstandes der Separatrix	95
6.7.3.	Variation der Pelletgröße im Niedrigdichtefall	107
6.7.4.	Reduktion der Pedestaltemperatur im Niedrigdichtefall	108
6.7.5.	Analyse der Abschirmung gegen Neutrale des Wandrecyclings	110
6.8.	Schlussfolgerungen für DEMO1	113
6.8.1.	Schadensbeiträge zur Bruttoerosion	114
6.8.2.	Transportmechanismus	115
6.8.3.	Neutralen-Reabschirmung im SOL	115
6.8.4.	Prompte Redeposition von erodiertem Wolfram	116
6.8.5.	Erosionsursachen	116
6.8.6.	Testfälle verschiedener Randschichtparameter	117
6.8.7.	Reduktion der Einschlussgüte im Niedrigdichtefall	117
6.8.8.	System der externen Brennstoffzufuhr	117
7.	Zusammenfassung	119
A.	Ergänzungen zu den PWW-Studien	123
A.1.	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Brennstoffionisation	123
A.2.	Ionendichteprofil im SOL bei konvektivem Senkrechttransport	124
A.3.	Reopazität des SOL für Pedestal-Neutrale	125
A.4.	Anteil an keV-Pedestal-Neutralen	126
A.5.	Schätzung der Transportkoeffizienten an der Separatrix	126
B.	Ergänzungen zu den Codes CELLSOR und CELLSOR ERO	128
B.1.	Numerischer Fehler der Rückrotationsmethode	128
B.2.	Lösung der Kontinuitätsgleichung im SOL: Variation der Konstanten	129
B.2.1.	Lösungen der homogenen Gleichung	129
B.2.2.	Lösungen der inhomogenen Gleichung	130
B.3.	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Thompson-Verteilung	132
B.4.	Zuweisung von Zellnummern	132
B.5.	Test der Verwerfungsmethode nach Cupini <i>et al.</i>	133
B.6.	CELLSOR-Rechnung des Ablationsprofils bei Pelletinjektion	133
B.6.1.	Quellprofil der Kontinuitätsgleichung	135
C.	Sonstiges	136
C.1.	Tritiumbedarf eines Kernfusionskraftwerks	136
C.2.	Zeitliche Entwicklung des Fusionsprodukts	137
C.3.	Erweiterungen des IPB98(y,2) Skalierungsgesetzes	137
C.3.1.	Stark abstrahlende Kernplasmen	137
C.3.2.	Dichte-Roll-Over und Einschlussverbesserung	138
C.3.3.	Ungelöste Probleme der IPB98(y,2)-Skalierung	139
C.4.	Zerstäubungskurve für $W^+ \rightarrow W$ nach Eckstein	140
Literaturverzeichnis		141

Energie & Umwelt / Energy & Environment
Band / Volume 414
ISBN 978-3-95806-307-5

Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft

