



# Plasma- Wand- Wechselwirkung als Schlüsselthema auf dem Weg zum Fusionsreaktor

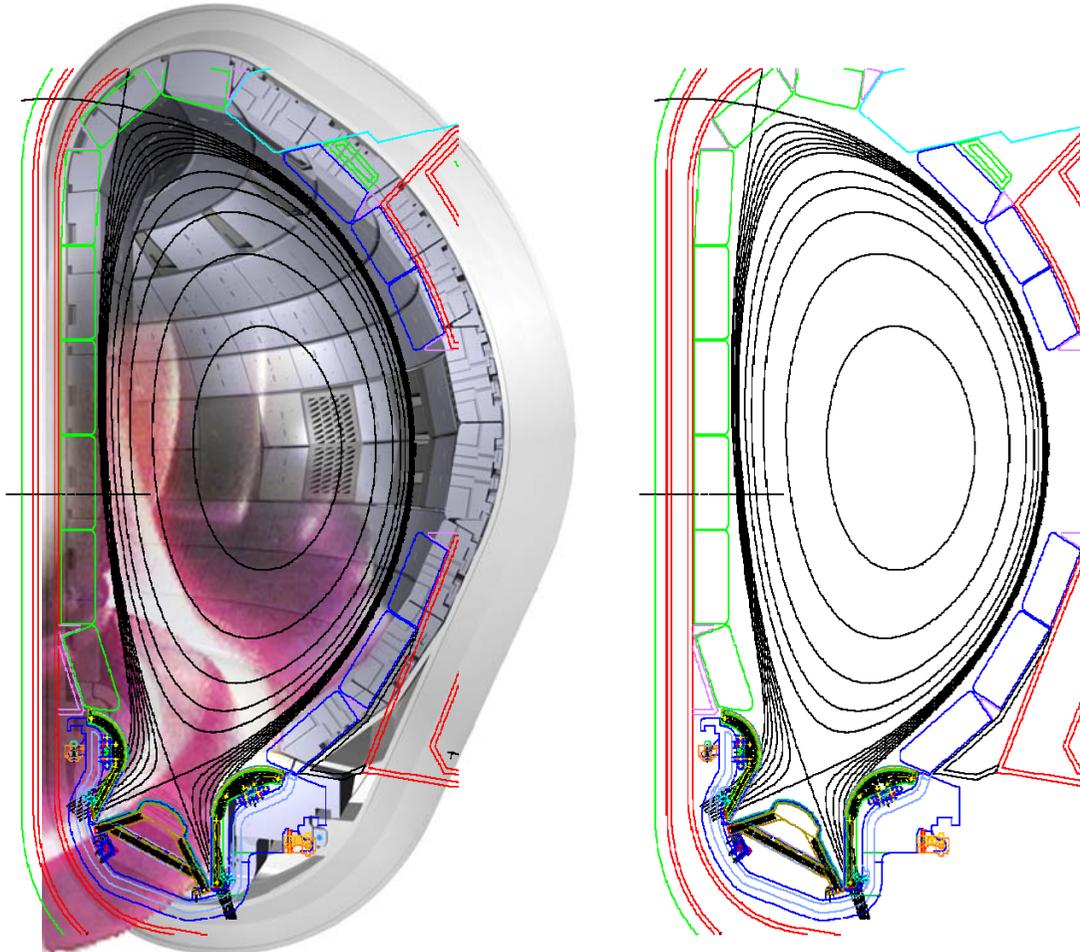
Bernhard Unterberg

Arbeitskreis Energie der  
Deutschen Physikalischen Gesellschaft  
Bonn, den 15. März 2010

[b.unterberg@fz-juelich.de](mailto:b.unterberg@fz-juelich.de)

# Energie- und Teilchenabfuhr (He – Asche)

ITER



Magnetfeld:

- Einschluss des Plasmas
- Ablenken des Plasmas (und der Energie in geladenen Teilchen) auf Wandkomponenten
  - Teilchenabfuhr 😊
  - Wärmeabfuhr ☹️



# Neue Herausforderungen für die Forschung zur Plasma- Wand- Wechselwirkung

- Der Schritt von heutigen Fusionsexperimenten zu ITER und DEMO:
  - Deutlich höhere Teilchen- und Wärmeflüsse auf die Wandkomponenten
  - Tritium und toxische Wandmaterialien (Be in ITER)
  - Aktivierung der Wandmaterialien durch 14 MeV Neutronen (DEMO!)
  
- Ziel dieses Vortrags:
  - *Darstellung der aktuellen Fragestellungen, Strategien zu ihrer Lösung und den wichtigsten Experimenten zur Plasma- Wand- Wechselwirkung*



# Schlüsselfragen zur Plasma- Wand- Wechselwirkung auf dem Weg zum Fusionsreaktor

- Die Lebensdauer der Plasma begrenzenden Wandkomponenten
  - Die Produktion von Staub durch Wanderosion
  - Das Inventar von Tritium im Vakuumgefäß
- *Verfügbarkeit und Sicherheit des Fusionsreaktors*
  - Die Verfügbarkeit bestimmt wesentlich die Ökonomie des Fusionsreaktors
    - *“power plant conceptual study” (EFDA 2005)\**

$$\text{coe} \propto \left( \frac{1}{A} \right)^{0.6} \frac{1}{\eta_{\text{th}}^{0.5}} \frac{1}{P_e^{0.4} \beta_N^{0.4} N^{0.3}}$$

A: availability  
 $\eta_{\text{th}}$ : plant efficiency  
 $P_e$ : net electric power  
 $\beta_N$ : normalised plasma pressure  
N: normalised Greenwald density

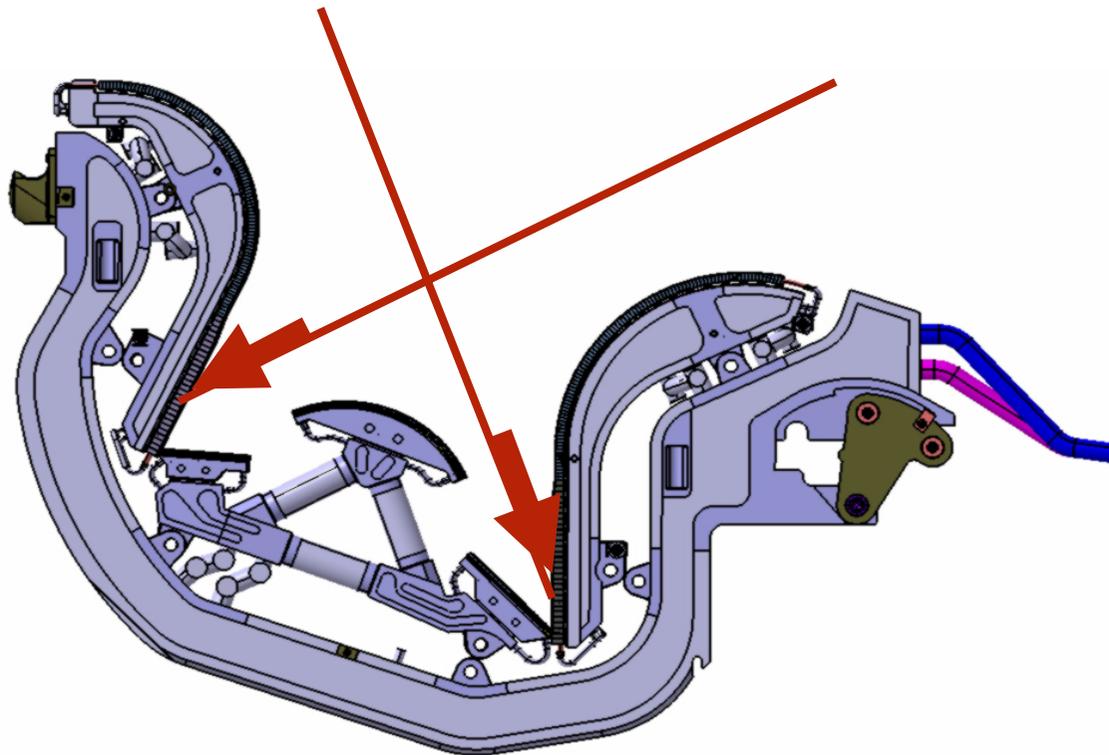
\* [http://www.efda.org/eu\\_fusion\\_programme/downloads/scientific\\_and\\_technical\\_publications/PPCS\\_overall\\_report\\_final.pdf](http://www.efda.org/eu_fusion_programme/downloads/scientific_and_technical_publications/PPCS_overall_report_final.pdf)



## Wandmaterialien in Fusionsanlagen

- Historische Entwicklung der Wandmaterialien
  - Metalle (Inconel)
  - Niedrig-Z Beschichtung: Karbonisierung, Borierung, Silizierung (Pionierarbeit am Tokamak TEXTOR im Forschungszentrum Jülich)
    - *Erweiterung des Betriebsbereich (weniger Sauerstoff, geringere Strahlungsverluste)*
  - Beryllium (JET)
  - Hoch-Z Wand: Molybdän in Anlagen mit hohem Magnetfeld (Alcator- Cmod, FTU), Wolfram (Pionierarbeit am ASDEX-Upgrade im Max-Planck- Institut für Plasmaphysik, Garching)

## (Stationäre) Energieabfuhr im Divertor



ITER:

$$P_{\text{heat}} = 150 \text{ MW}$$

$$A_{\text{DIV}} = 4 \text{ m}^2$$

---


$$q_{\perp} \sim P_{\text{heat}} / A_{\text{Div}}$$

- Strahlungskühlung durch Verunreinigungen in der Randschicht und im Divertor
- Reduktion des Plasmadruckes entlang B durch Reibung notwendig (“detachment”)
  - **Wärmelastverhalten des Wandmaterials**
  - Günstig: *Wolfram* (höchster Schmelzpunkt), *Kohlenstoff* (nur Verdampfung)
  - Limit:  $q = 10 \text{ MWm}^{-2}$



## Transiente Wärmelasten

- Edge localised modes (ELMs) - periodische Instabilitäten am Plasmarand → transiente Wärmepulse und Teilchenpulse auf die Wand
- Disruptionen – Abriss des Plasmastroms im Tokamak → abrupter Verlust der gespeicherten Energie auf die Wand
- Lageinstabilitäten

<b>ITER</b>	Energieverlust auf die Wand $E / \text{MJ}$	Energiedichte im Divertor $E_{\text{DIV}}$ ( $\text{MJ m}^{-2}$ )	Schmelzparameter* $\epsilon_{\text{melt}}$ ( $\text{MJm}^{-2}\text{s}^{-1/2}$ )
ELM	20	9.5	<b>601</b>
Disruption	88-175	3.1 - 12.5	<b>322</b>

Zum Vergleich: W schmilzt bei  $\epsilon_{\text{melt}} \geq 48 \text{ MJm}^{-2}\text{s}^{-1/2}$

\* Temperaturerhöhung auf Schmelztemperatur nach  $\Delta T \sim P \sqrt{t}$

# Materialschäden durch transiente Wärmelasten

*Bridging of gaps due to melt motion, 100 shots @  $w = 1.6 \text{ MJ/m}^2$*



Wolfram

**Quasi stationary plasma accelerator, Troitsk, Russia  
(A. Zhitlukhin et al., J. Nucl. Mater. 363-365 (2007), 301.)**

# Materialschäden durch transiente Wärmelasten – Verlust der Schmelzschicht durch Wegspritzen

Experimente am Tokamak TEXTOR: W- Testlimiter, Exposition bis zu  $30 \text{ MWm}^{-2}$



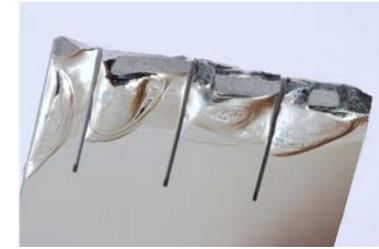
Bewegung der  
Schmelze dominiert  
durch  $j \times B$  Kraft

J. Coenen et al.

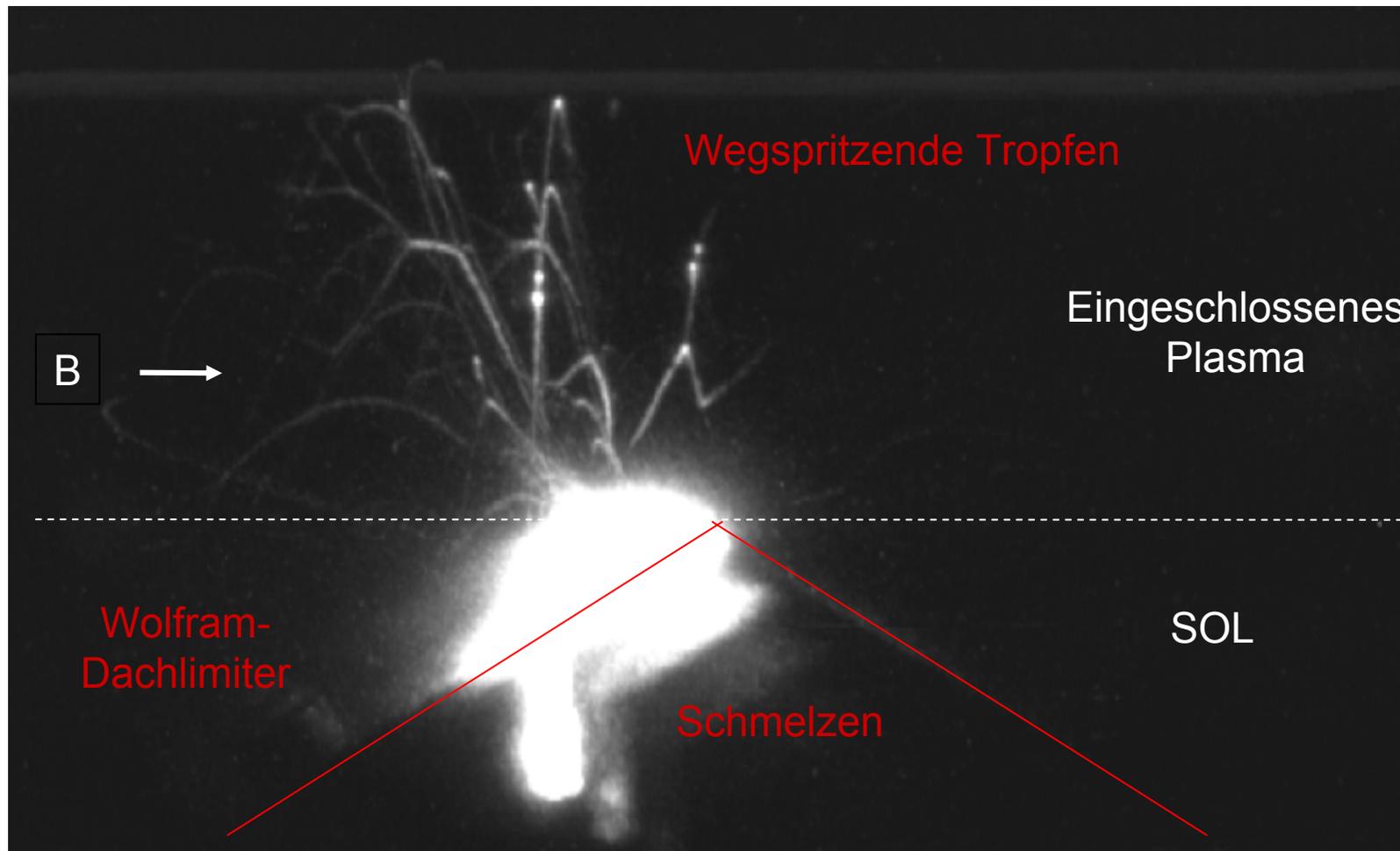
$\sim 20 \text{ MW/m}^2$



$> 20 \text{ MW/m}^2$

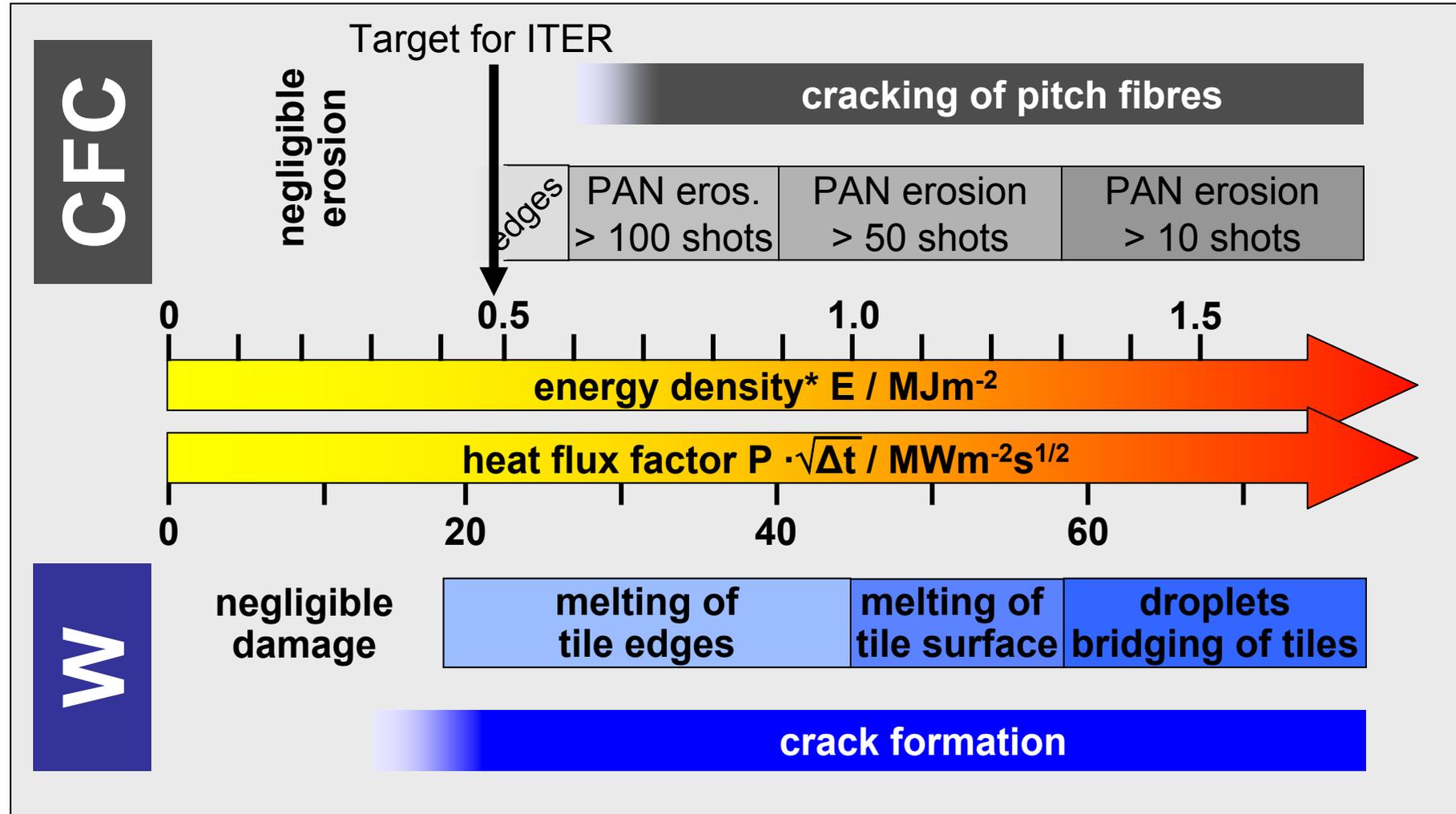


# Schmelzverluste vom Wolframlimiter in TEXTOR



Terminierung der Plasmaentladung durch Disruption

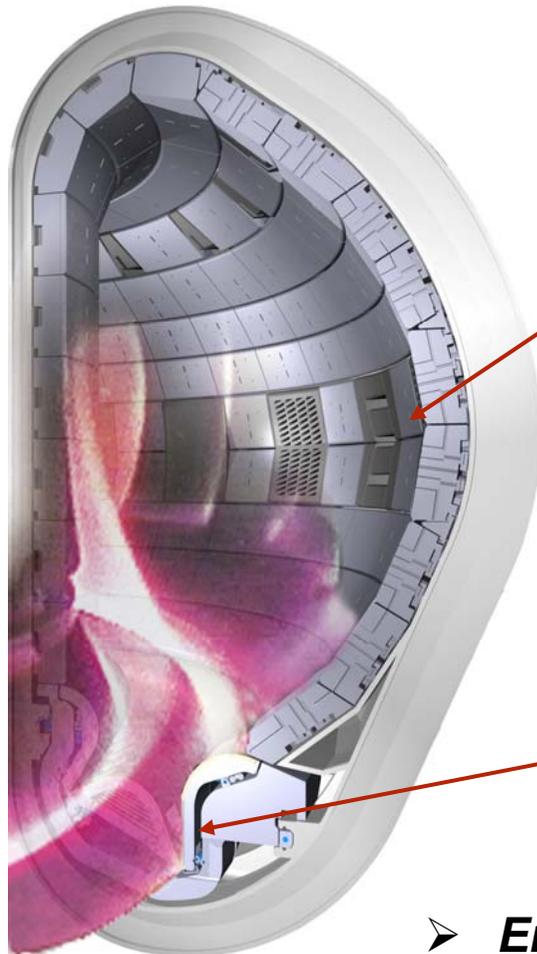
# Materialschäden durch transiente Wärmelasten



J. Linke, Forschungszentrum Jülich

\*  $\Delta t = 500 \mu\text{s}$ ,  $T = 500^\circ\text{C}$

# Teilchenflüsse auf die Wandkomponenten in ITER (Extrapolation und Modellierung)



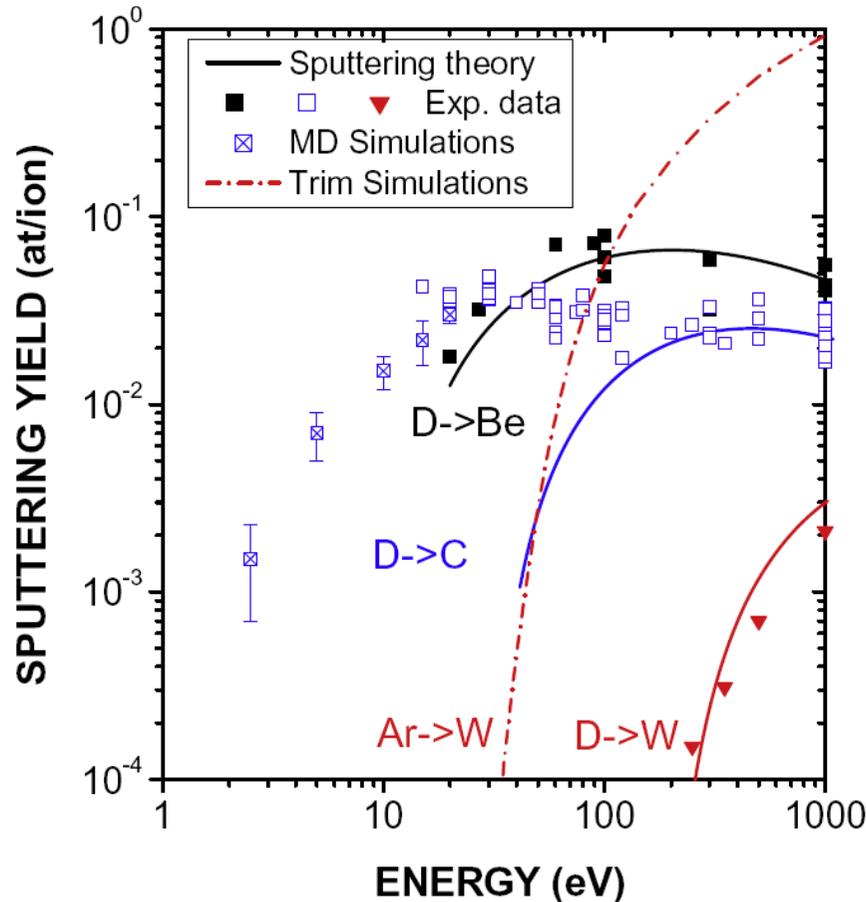
Erste Wand:  $10^{19}$ - $10^{21}$   $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$

Divertor:  $> 10^{24}\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$

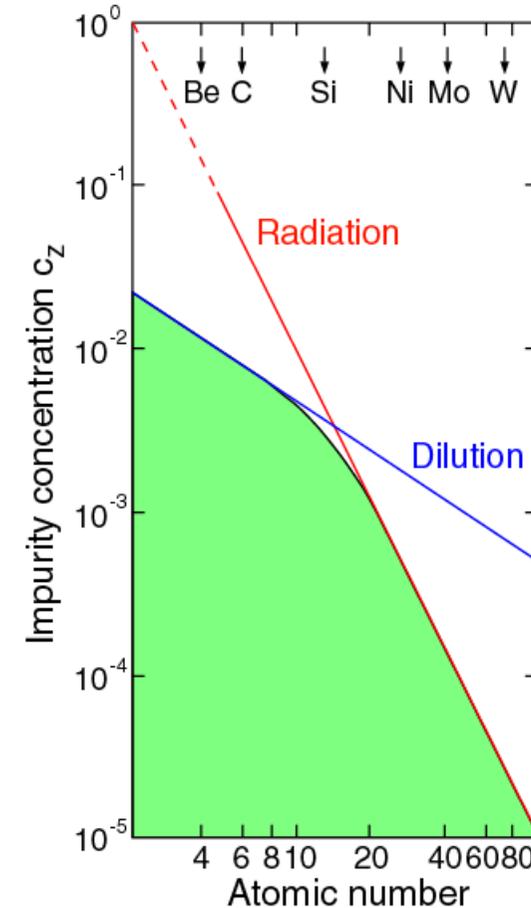
➤ ***Erosionsverhalten des Wandmaterials***

# Erosion von Fusionsmaterialien für Wandkomponenten

J. Roth et al./Journal of Nuclear Materials 390–391 (2009) 1–9



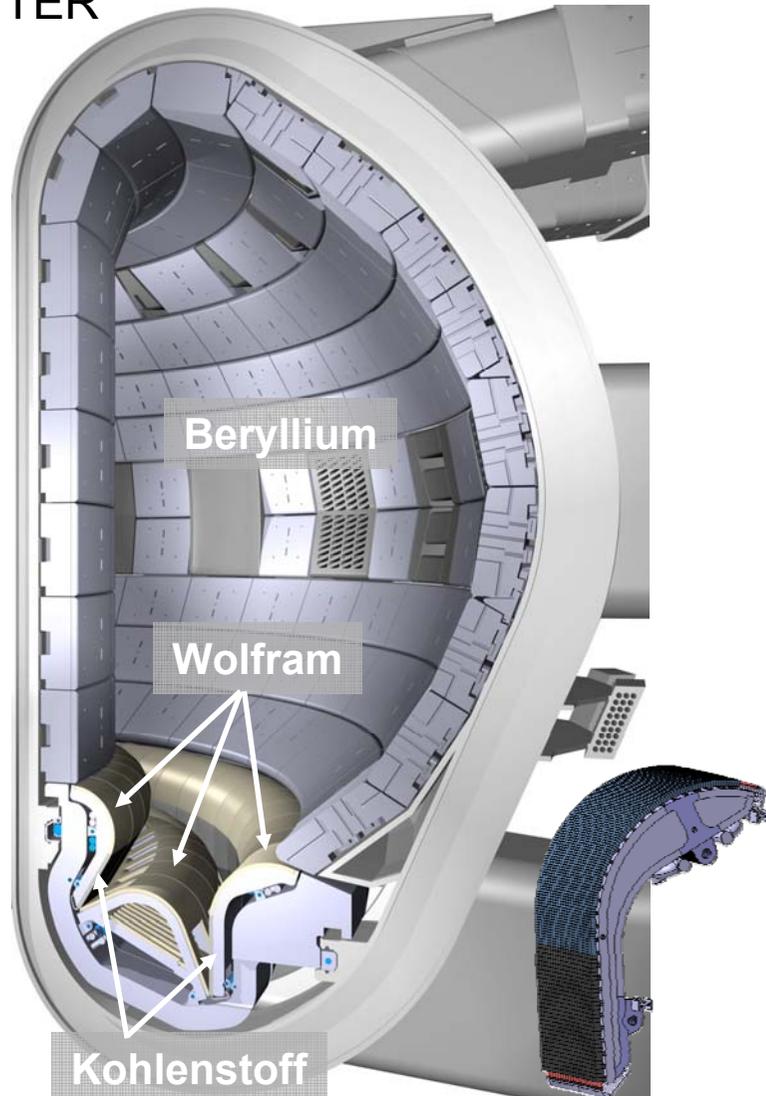
**Signifikanter Vorteil für schwere Wandmaterialien**



**Trade-off mit Verunreinigungs-konzentration im Plasma**

## Wandmaterialien in ITER

ITER



- Erste Wand: Beryllium
  - Niedrig Z, Sauerstoffkontrolle
- Divertor- Baffle: Wolfram
  - Niedrige Zerstäubungsausbeute
- Divertor- Target: Kohlenstoff (CFC)
  - Kein Schmelzen, tolerant gegen Wärmeexkursionen
- Divertortarget für DD- und DT-Betrieb: Wolfram



## Abschätzung der Lebensdauer von Divertor und erster Wand in ITER (Roth et al. J. Nucl. Mater. 390-391(2009), 1- 9)

Average and peak erosion rate for the ITER first wall, and associated PFC lifetime.

Wall material	Erosion rate (nm/s)	Erosion source (atoms/s)	Eroded material (g/shot)	Lifetime (shots)
Be (C) average	0.1	$8 \times 10^{21}$	48	20000
peak 50 m <sup>2</sup>	4			5000
W average	0.01	$2 \times 10^{20}$	26	200000
peak 50 m <sup>2</sup>	0.1			20000

Gross and net erosion rate for the ITER divertor, and associated PFC lifetime.

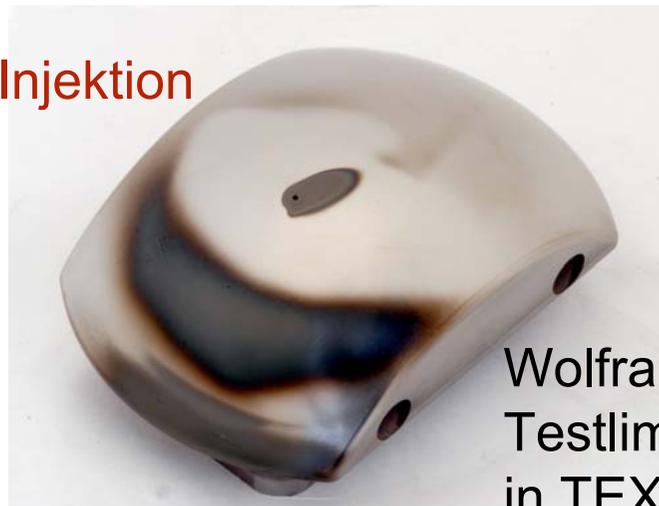
Divertor mat.		Erosion rate (nm/s)	Erosion source (atoms/s)	Eroded material (g/shot)	Lifetime (shots)
CFC	Gross	100	$4 \times 10^{22}$	330	200
	Net	1	$4 \times 10^{20}$	3	20000
W	Gross	2	$4 \times 10^{20}$	48	10000
	Net	0.3	$6 \times 10^{19}$	7	60000



## Lebensdauer der Wandkomponenten – gemischte Materialsysteme

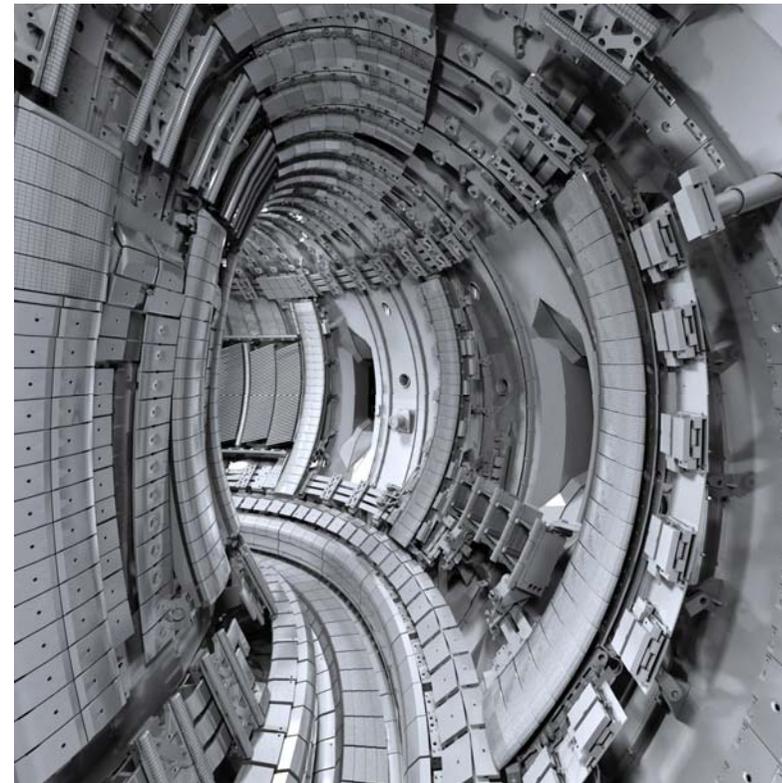
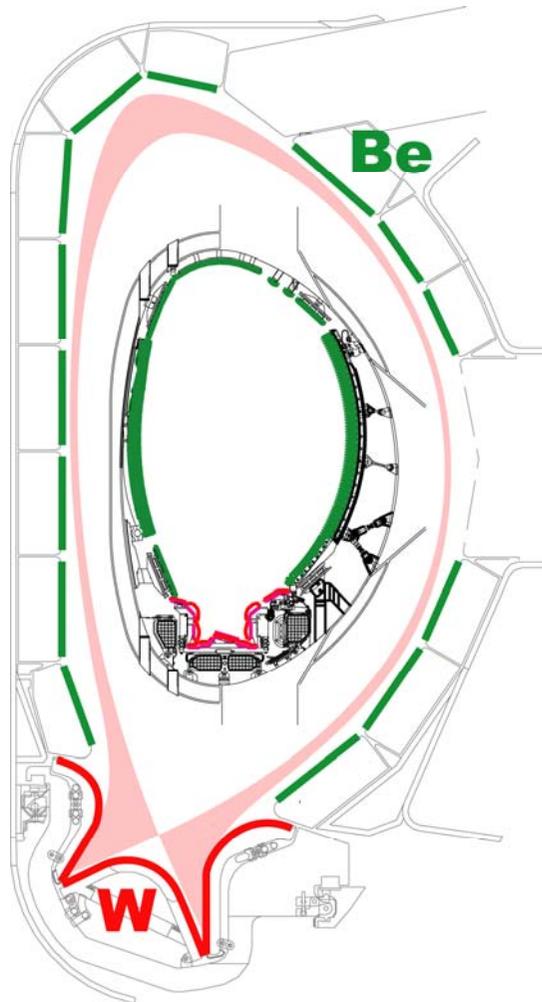
- Mischung durch Migration (Erosion und Deposition) des Wandmaterials
- Ausbeute für Re-Erosion von deponierten Schichten
- Synergetische Effekte
- Validierung von Modellen für die Extrapolation zu ITER

$^{13}\text{CH}_4$  Injektion

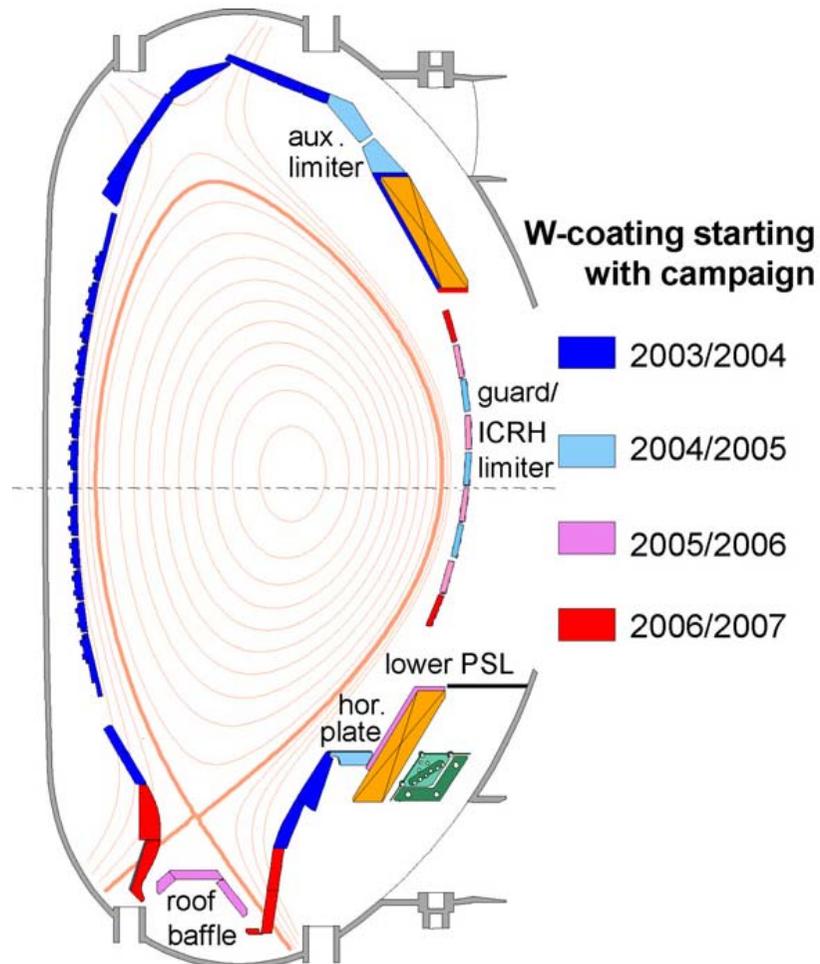


Wolfram-  
Testlimiter  
in TEXTOR

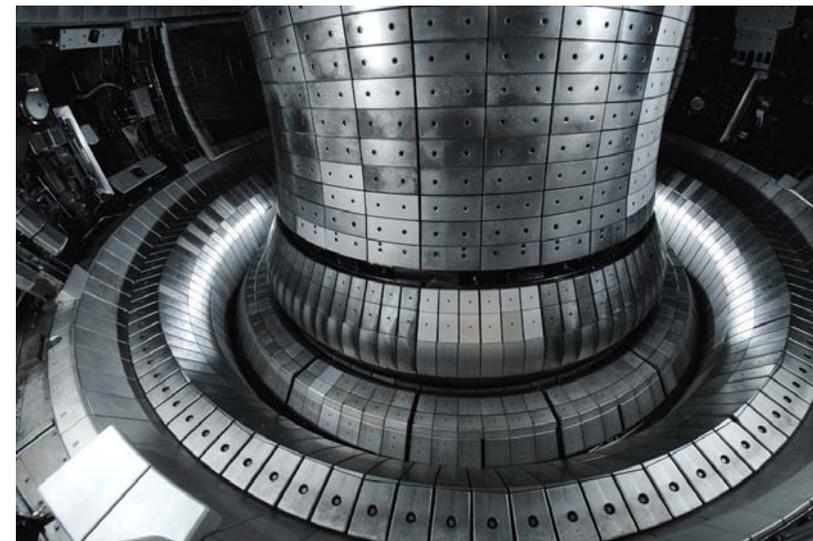
## “ITER-like wall” im Tokamak JET (ab 2011)



# Die Wolframwand in ASDEX-Upgrade



Fortschreitender Ausbau der Wolfram- Bedeckung

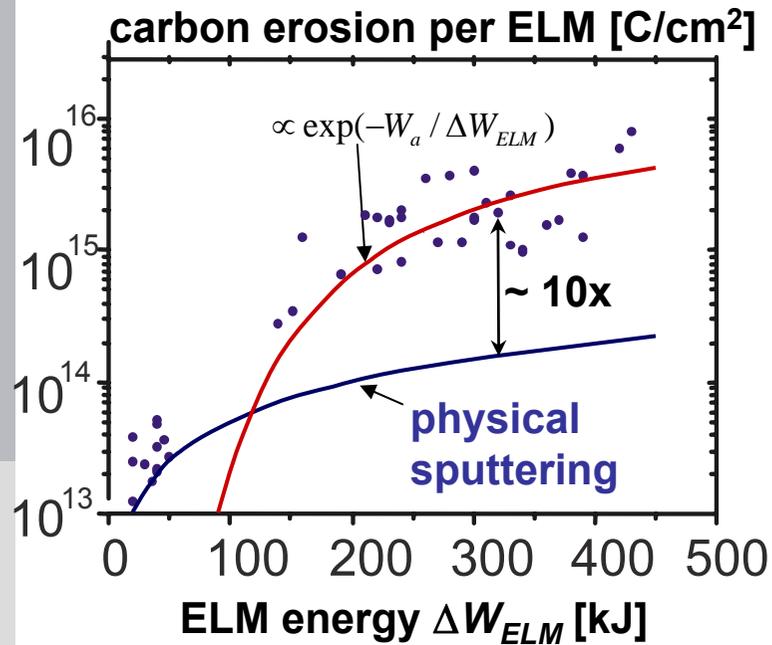


heute

R. Neu et al., J. Nucl Mater 67-70 (2007) 1497

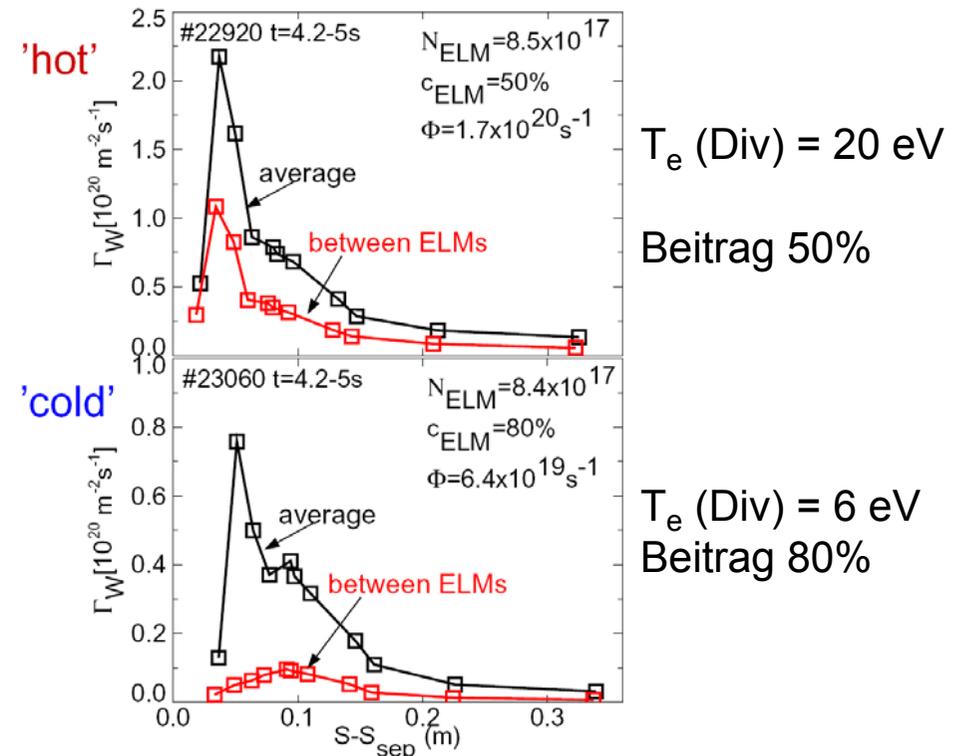
# Lebensdauer der Wandkomponenten – Erosion durch transiente Ereignisse (ELMs, Disruptionen)

Erhöhte C- Erosion durch ELMs in JET



A. Kreter et al., Phys. Rev. Lett. 102, 045007 (2009).

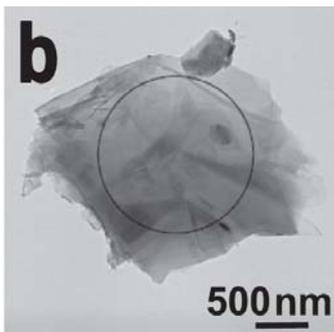
Beitrag der ELMs zur W- Erosion  
in ASDEX-upgrade



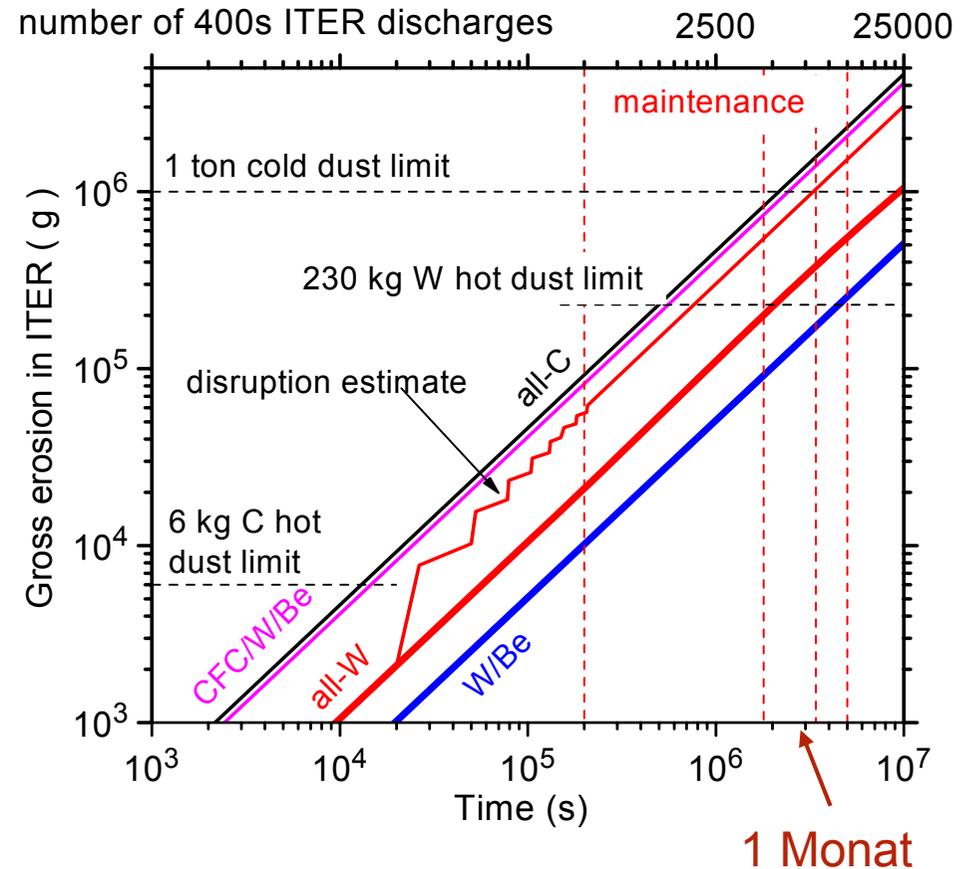
R. Dux et al., J. Nucl. Mater., 390-391, June 2009, Pages 858-863

# Erosion und Staubbildung – wichtige Fragestellung der PWW Forschung

- Sicherheitsrisiken durch Staubbildung
  - Kalter Staub – T inventar
  - Heißer Staub / Staub auf heißen Oberflächen – Explosionsgefahr bei Luft / Wasserdampfeinbrüchen
- Konversionsfaktor Staubmenge / Erodierter Stoffmenge:
  - ~ 0.1 (heutige Experimente)
  - ~ 1 (konservative Abschätzungen)



Staubpartikel aus amorpher a-C:H Schicht in TEXTOR  
 D. Ivanova et al., Phys. Scr. T138 (2009) 014025 (6pp)

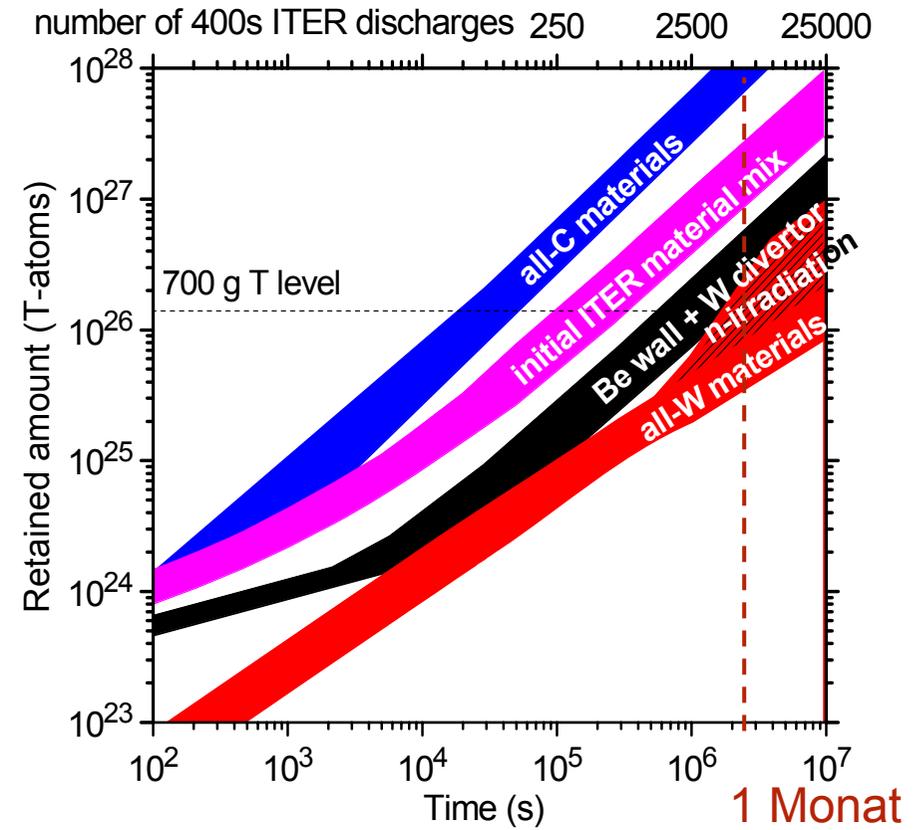


Brutto- Erosion in ITER und Grenzen für Staubbildung

J. Roth et al., J. Nucl.Mater. 390-391 (2009) 1-9

# Tritiuminventar

- Sicherheitsrisiko im Fusionsreaktor (Freisetzung)
  - Ko-Deposition
  - Implantierung
- Oberflächentemperatur wichtiger Parameter
- Zusätzliche Fehlstellen durch Neutronenschädigung erhöhen Inventar (DEMO!)

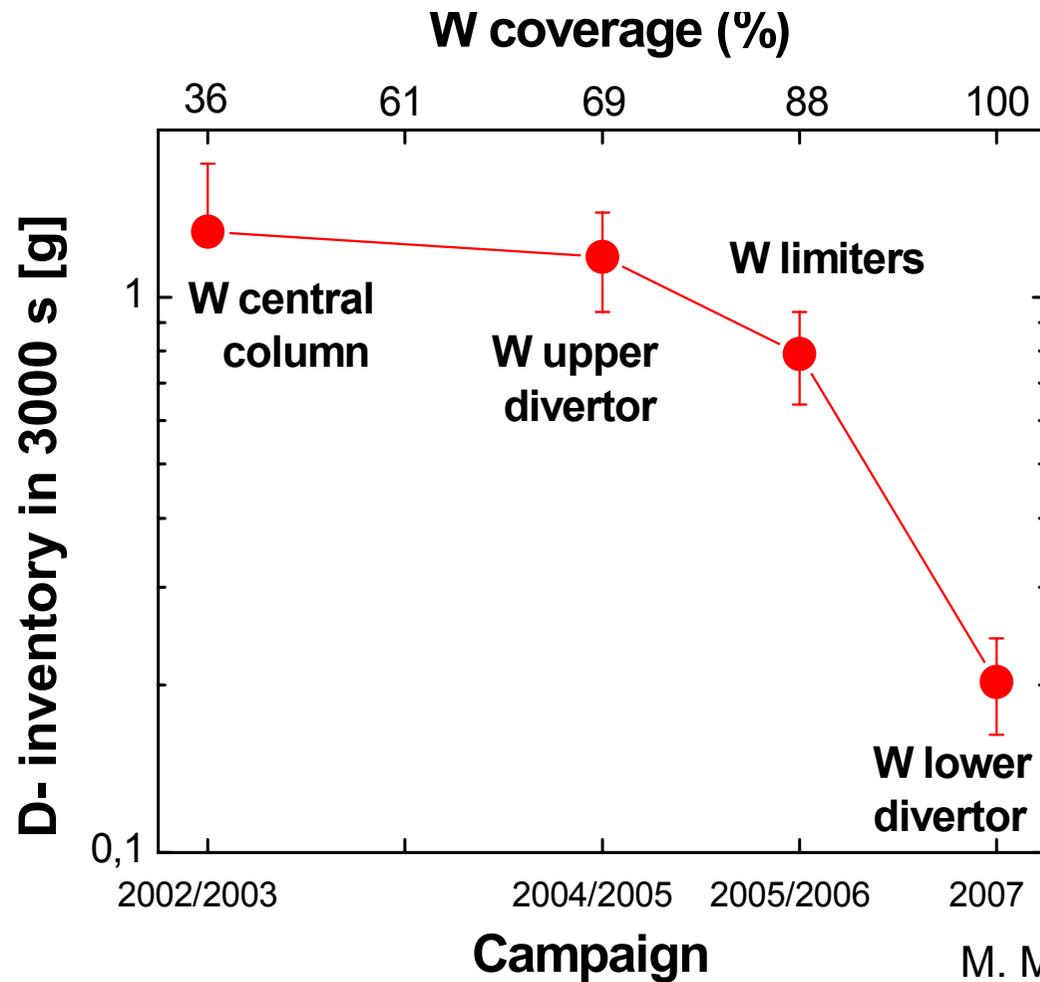


Tritiuminventar in ITER

J. Roth et al., J. Nucl.Mater. 390-391 (2009) 1-9



# Unterdrückung der Wasserstoffrückhaltung mit fortschreitender Bedeckung der ASDEX-Upgrade Wand mit Wolfram



M. Mayer et al.,  
J. Nucl. Mater. 390-391 (2009), 538



## Schlussbemerkungen

- Im Hinblick auf die PWW- Fragestellungen *Lebensdauer der Wandkomponenten, Staubbildung* und *Tritiuminventar* ist Wolfram das am besten geeignete Wandmaterial für Fusionsanlagen.
- Die Entwicklung von dazu kompatiblen Plasmaszenarien (ohne Disruptionen, mit stark abgeschwächten ELMs, mit gutem Energieeinschluss, ...) bleibt eine Herausforderung und wird an magnetischen Einschlussexperimenten bewältigt (JET, ASDEX-Upgrade).
- Spezifische Fragestellungen zur PWW (insbesondere zum Einfluss der Neutronenschädigung von Wandmaterial) können am besten in Plasmasimulatoren und Wärmelast-Experimenten beantwortet werden.



## Ausblick: Neuer Programmschwerpunkt im FZJ - “Plasma-Wand-Wechselwirkung in nuklearer Umgebung”

- Test von Neutronen bestrahlten und toxischen Wandmaterialien unter Wärmelast und Plasma- Exposition
- Ziel: Charakterisierung des Einflusses der Neutronenbestrahlung auf:
  - Thermo- mechanische Eigenschaften von Wandmaterialien (Ermüdung, Schockbelastung)
  - PWW Prozesse (Erosion, Brennstoffrückhaltung und Staubbildung)
- Elemente des Programms:
  - Lineare Plasmaanlage in einer Heißen Zelle (JULE-PSI) mit integrierter Analysestation
  - Wärmelasttests mit einer Elektronenstrahl - Anlage in einer Heißen Zelle (JUDITH)
  - Oberflächenanalyse in einer Heißen Zelle (Heißes Materiallabor)

