

Nano-Strukturschäden in bestrahlten Werkstoffen

F. Bergner

Institut für Sicherheitsforschung



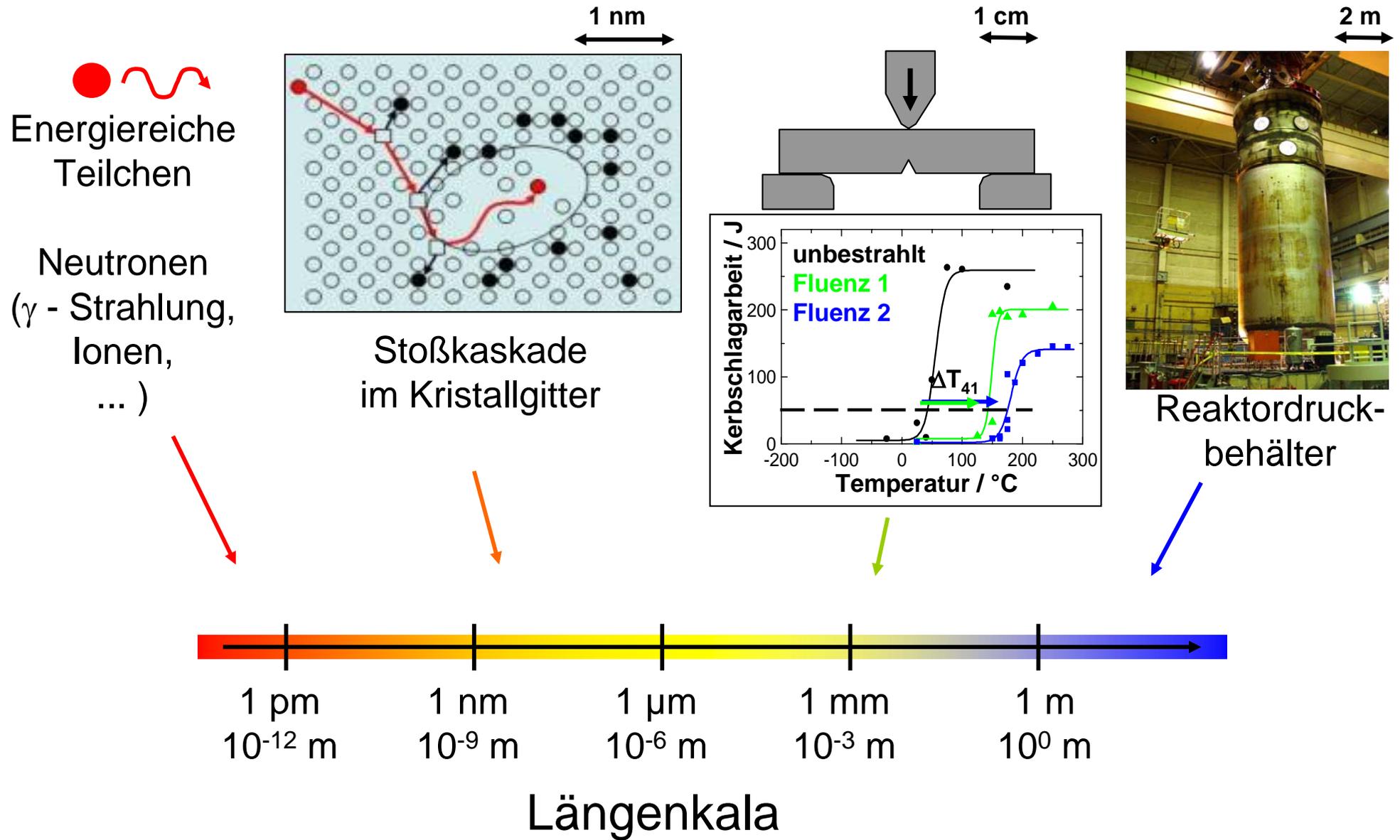
Forschungszentrum
Dresden Rossendorf

Gliederung

Einleitung

1. Bildung von Defekt-Fremdatom-Clustern (→ nm-Skala)
2. Behinderung der plastischen Verformung (→ μm -Skala)
3. Veränderungen des Bruchverhaltens (→ cm-Skala)

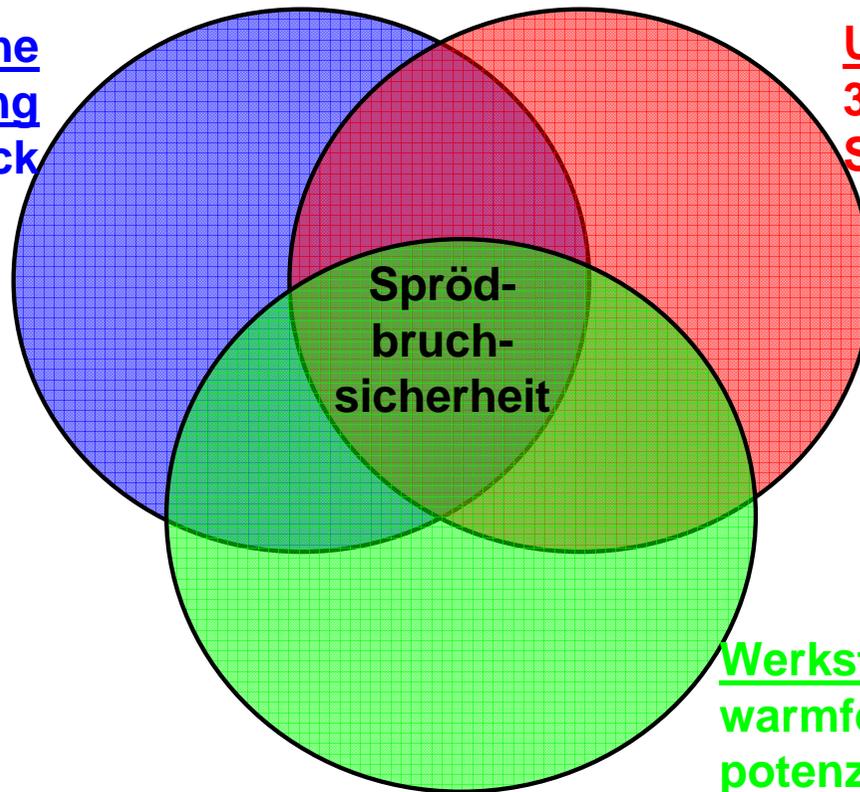
Fazit



Szenarium

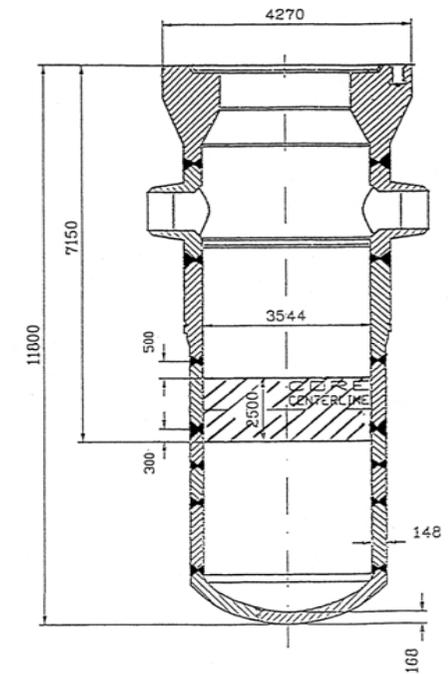
Druckbehälter eines Druckwasserreaktors:
Gewährleistung der Sprödbruchsicherheit,
!!! Behälter nicht austauschbar !!!

Mechanische Beanspruchung
Innendruck



Umgebung
300°C,
Spaltneutronen

Werkstoff
warmfester Stahl,
potenziell Risse



Problemstellung

- (1) Welche Veränderungen auf der nm-Skala werden durch die Bestrahlung im Kristallgitter hervorgerufen und wie können diese nachgewiesen werden?
- (2) Wie wirken sich diese Gitterstörungen auf die Festigkeit des Kristallgitters auf der µm-Skala aus?
- (3) Welche Konsequenzen bestehen für das Bruchverhalten auf der Makroskala und wie erfolgt der Sprödbruchsicherheitsnachweis?

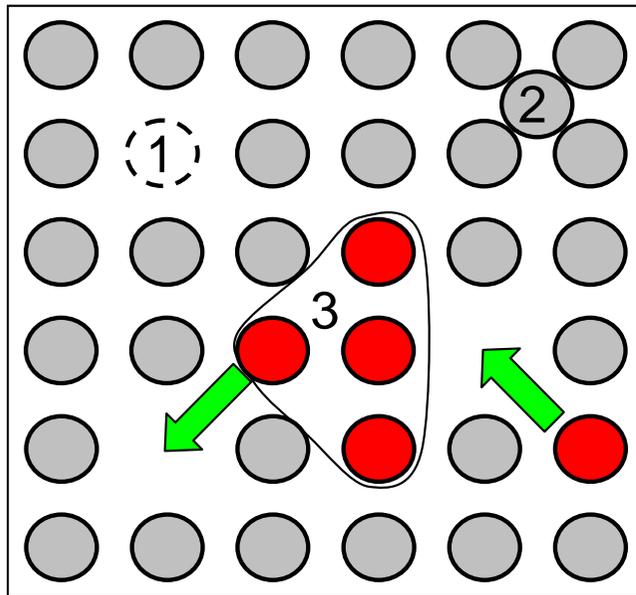
Gliederung

Einleitung

- 1. Bildung von Defekt-Fremdatom-Clustern (→ nm-Skala)**
2. Behinderung der plastischen Verformung (→ μm -Skala)
3. Veränderungen des Bruchverhaltens (→ cm-Skala)

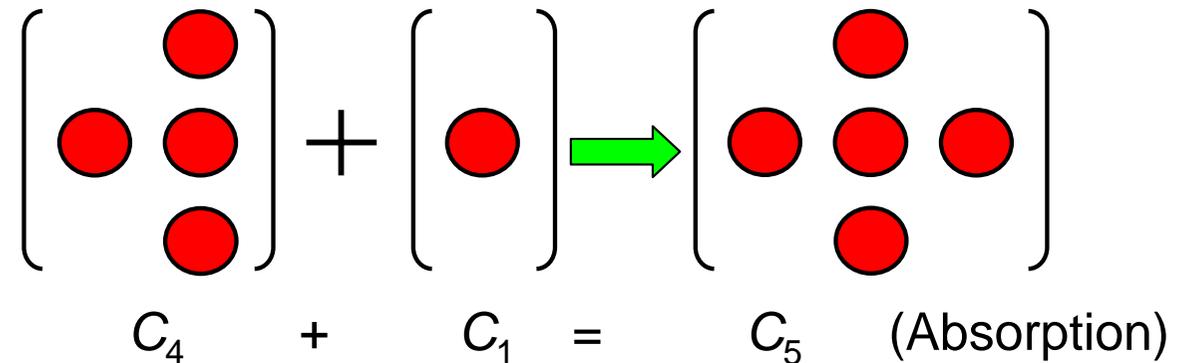
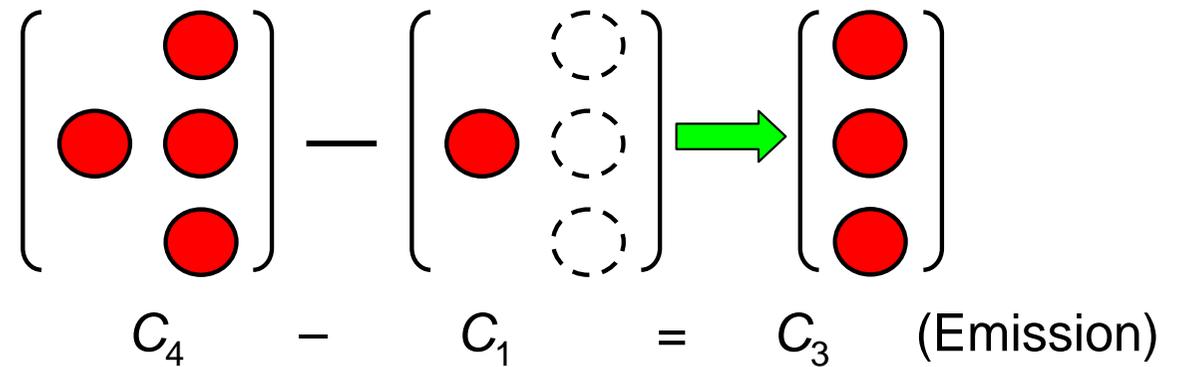
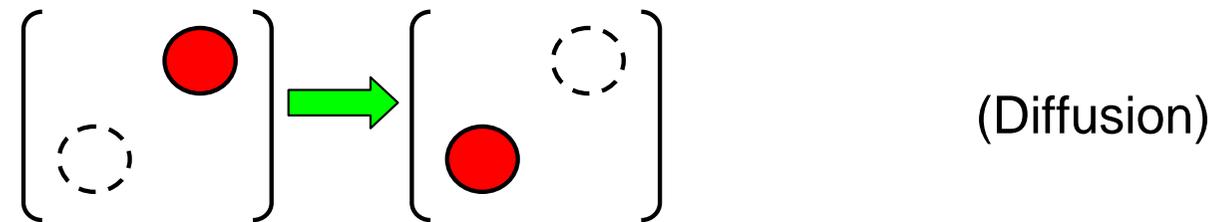
Fazit

Fe-Gitter mit Störungen



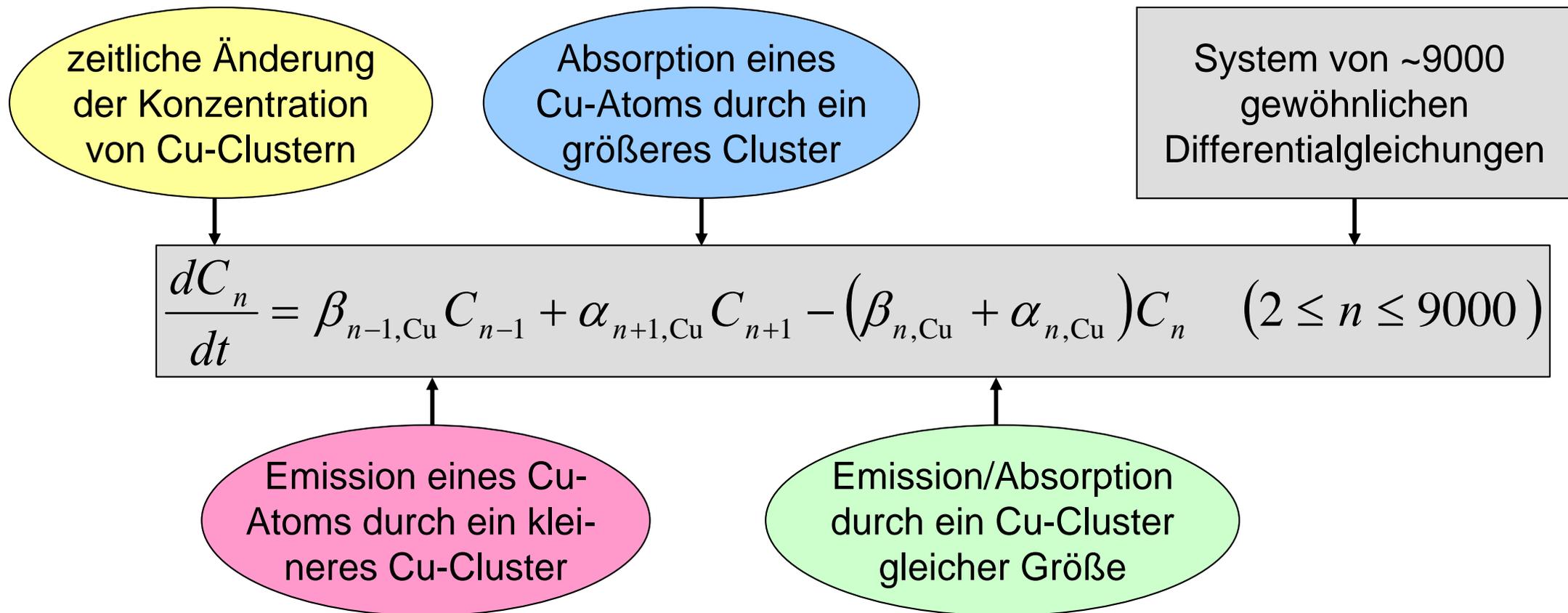
- 1 – Leerstelle
- 2 – Zwischengitteratom
- 3 – Cu-Cluster

Reaktionen von Gitterstörungen

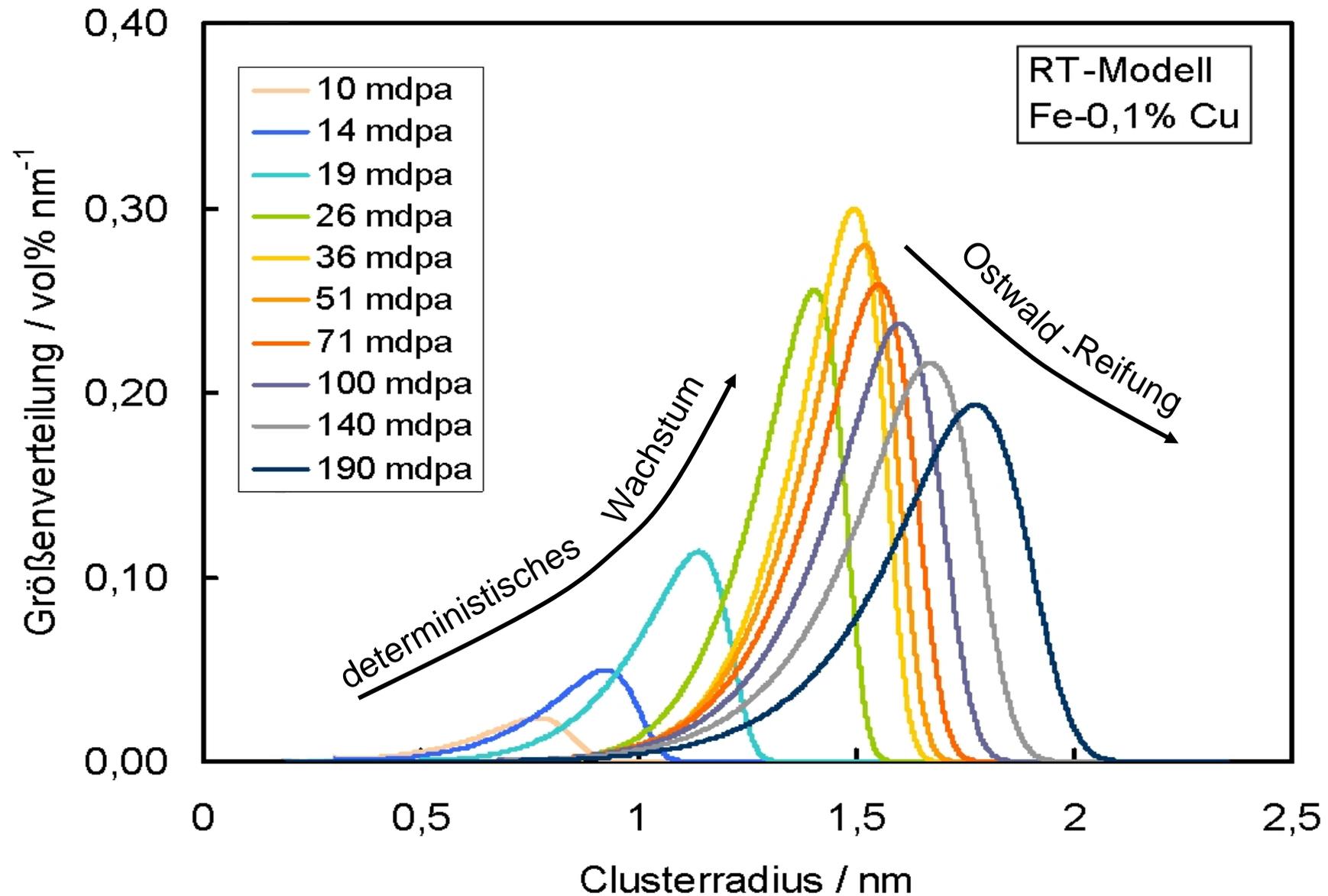


Reaktionskinetische Ratentheorie

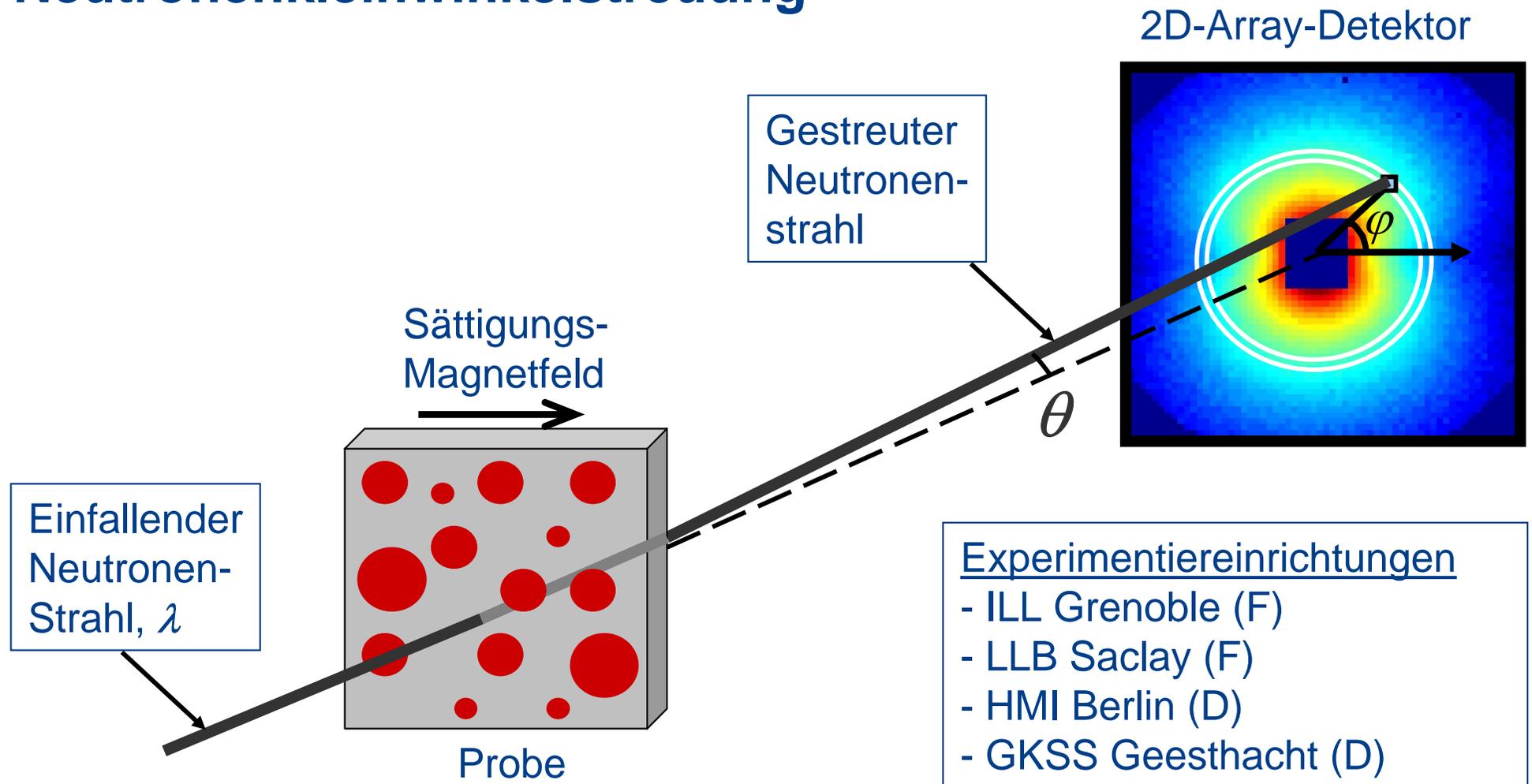
Bilanzgleichung für Cu-Cluster, die aus einer Anzahl n von Cu-Atomen bestehen:



Berechnete Größenverteilung der Cu-Cluster



Experimenteller Nachweis mittels Neutronenkleinwinkelstreuung

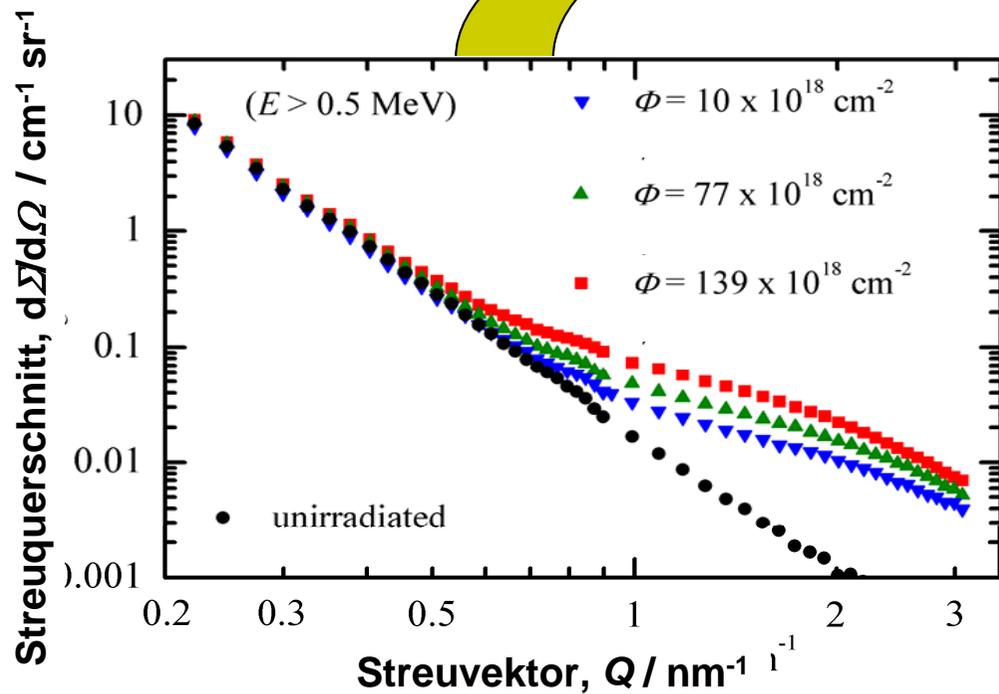


Gemessene Größenverteilung der Cu-Cluster

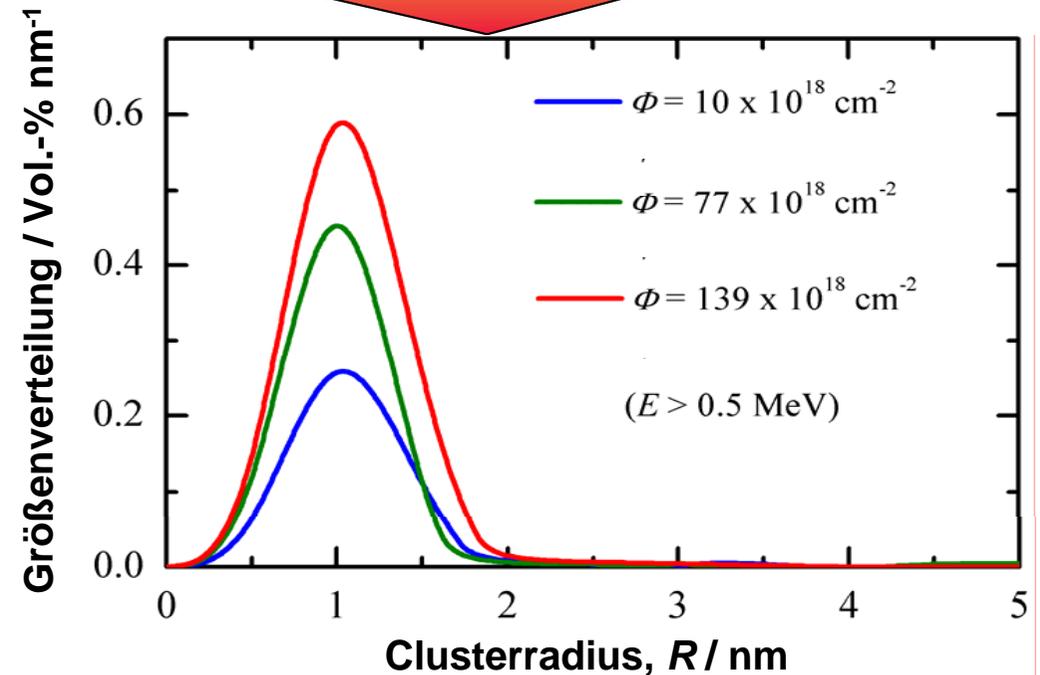
Streukurve

$$\frac{d\Sigma}{d\Omega_{\text{mag}}}(Q) \xrightarrow{\text{Inverses Problem}} c(R)$$

Größenverteilung



$$Q = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \theta$$



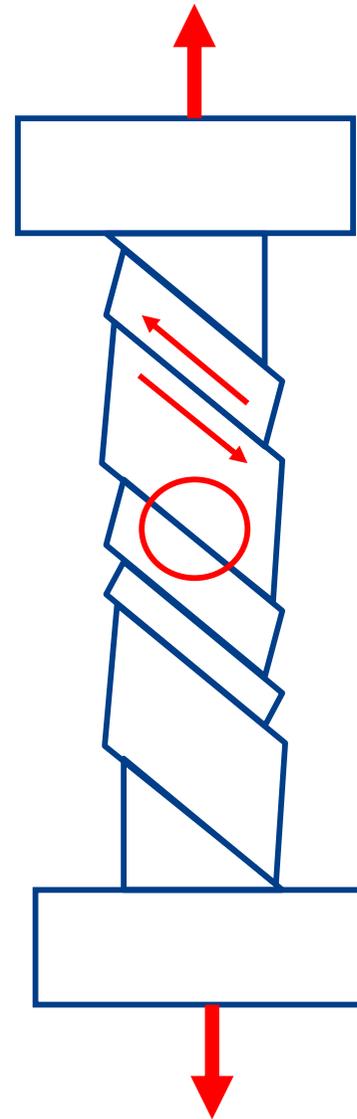
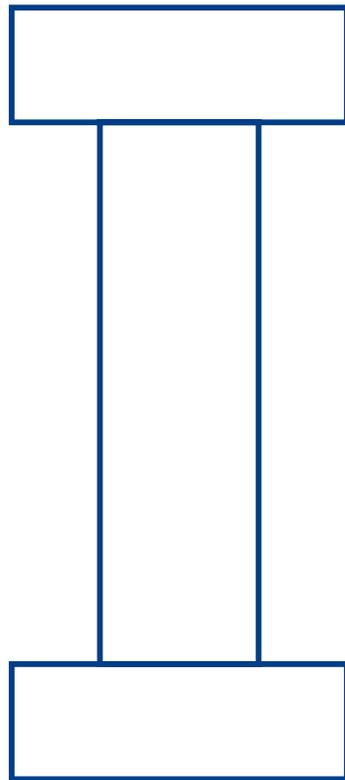
Gliederung

Einleitung

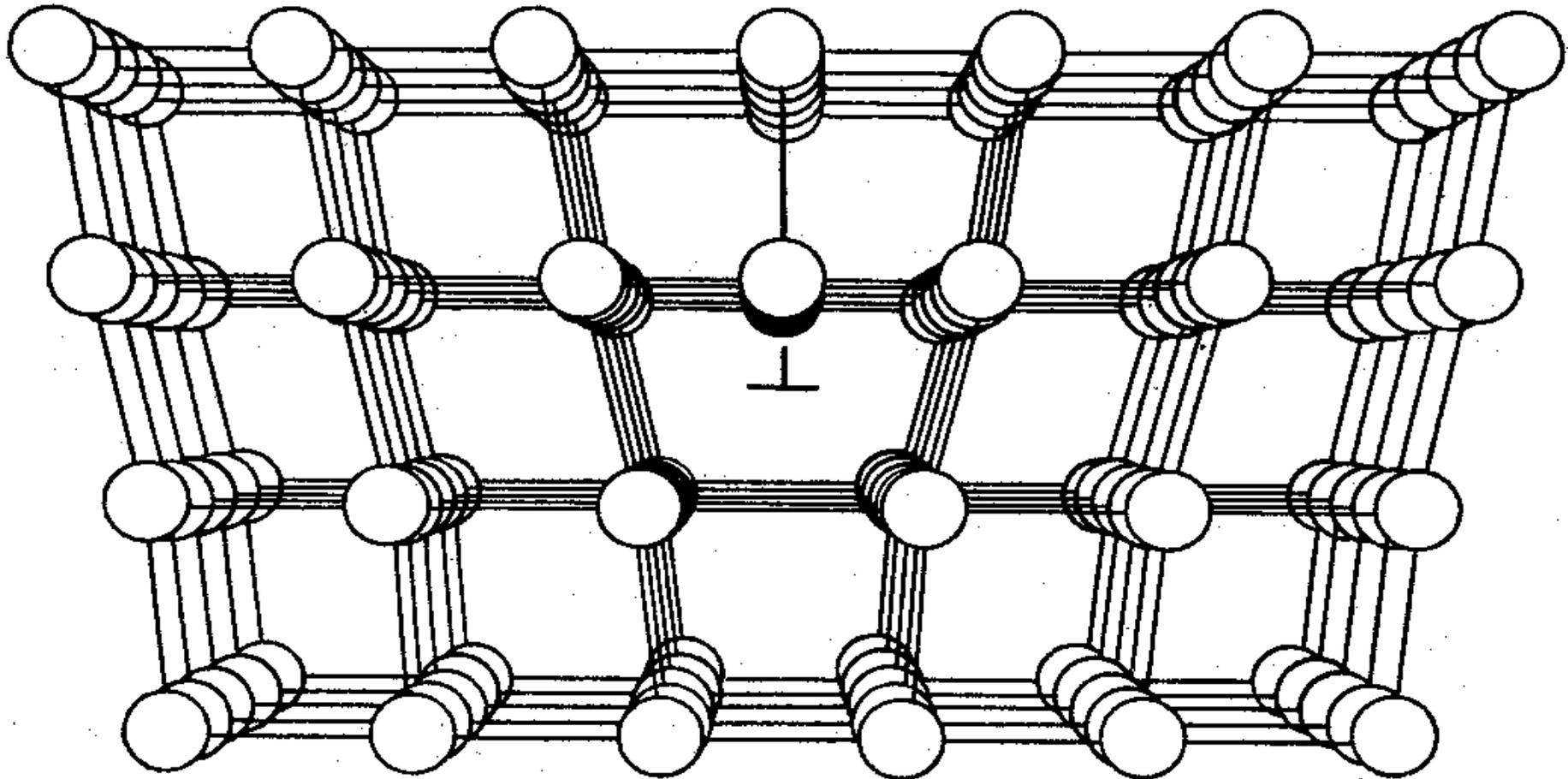
1. Bildung von Defekt-Fremdatom-Clustern (→ nm-Skala)
- 2. Behinderung der plastischen Verformung (→ μm -Skala)**
3. Veränderungen des Bruchverhaltens (→ cm-Skala)

Fazit

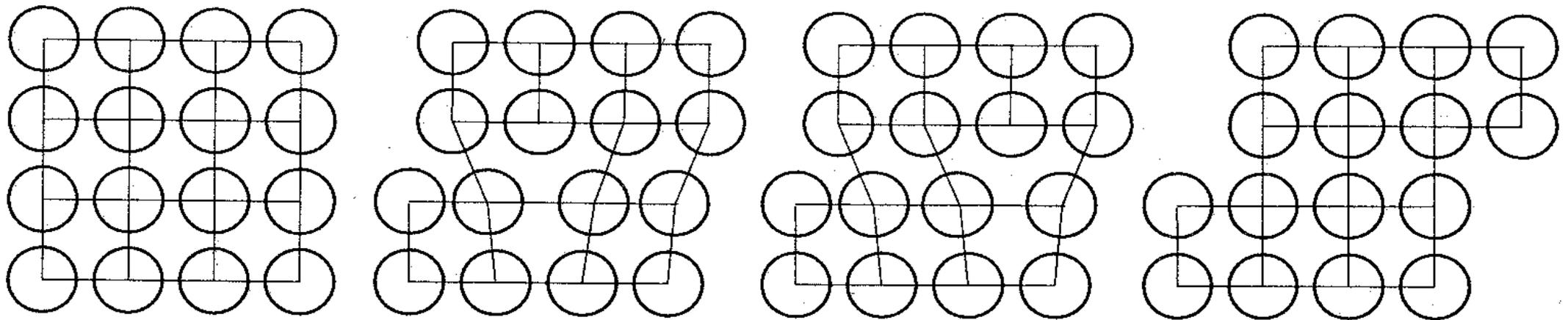
Zugbeanspruchung



Stufenversetzung



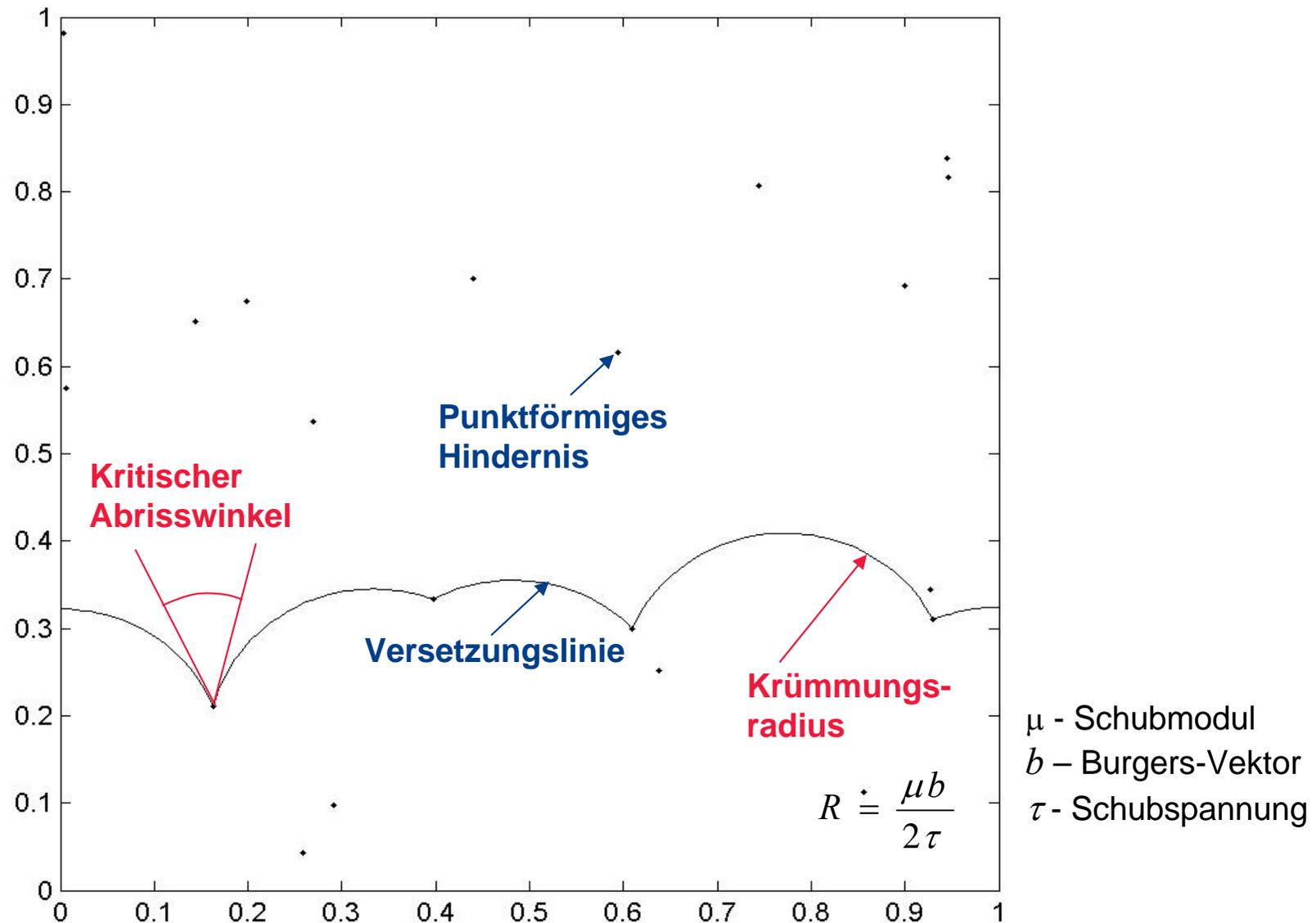
Gleiten einer Stufenversetzung



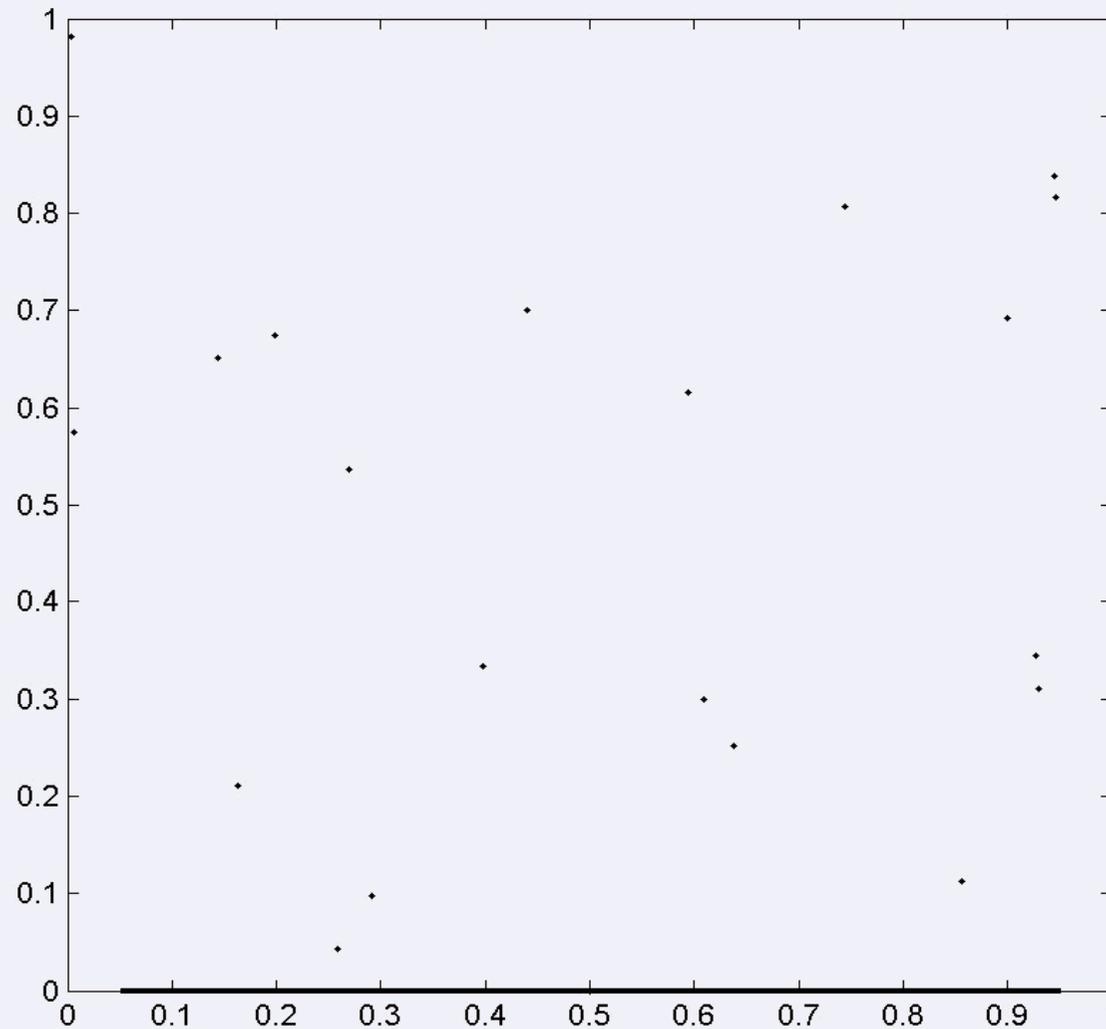
Simulation der plastischen Verformung auf der μm -Skala

Fakten:

- Es gibt 0-, 1-, 2- und 3-dimensionale Gitterbaufehler.
- Versetzungen gehören zu den 1-dimensionalen (linienförmigen) Gitterbaufehlern.
- Die plastische Verformung von Metallen vollzieht sich über das Gleiten von Versetzungen.
- Erhöhung der Festigkeit = Behinderung des Gleitens von Versetzungen $\sim 1/\text{Hindernisabstand}$.

Simulation der plastischen Verformung auf der μm -Skala

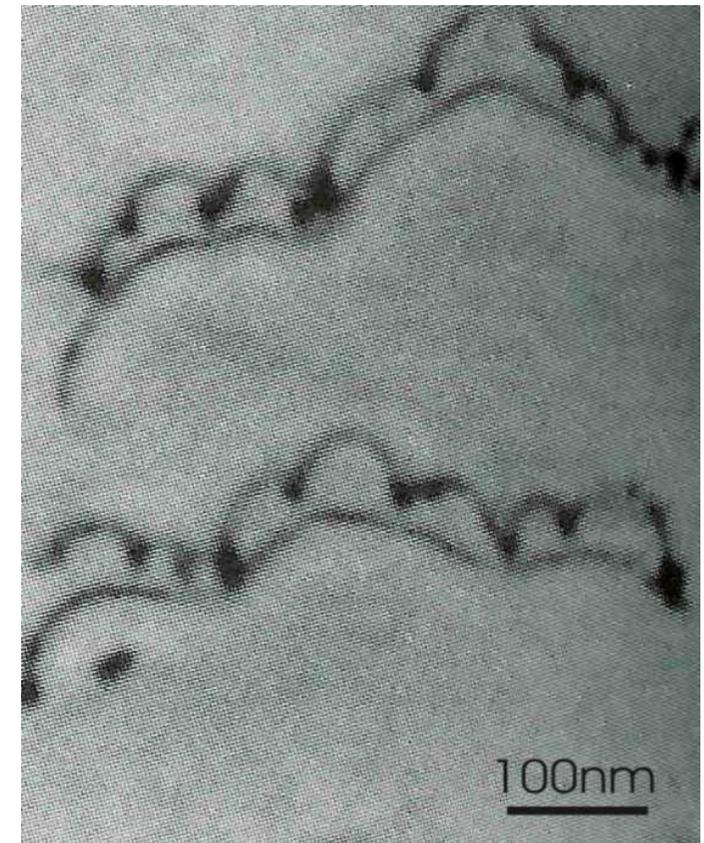
Simulation der plastischen Verformung auf der μm -Skala



Experimentelle Beobachtung der Versetzungsbewegung



Transmissionselektronenmikroskop



TEM-Aufnahme

Gliederung

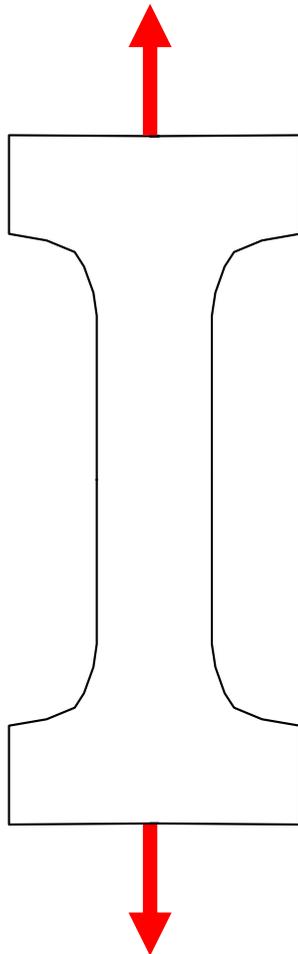
Einleitung

1. Bildung von Defekt-Fremdatom-Clustern (→ nm-Skala)
2. Behinderung der plastischen Verformung (→ μm -Skala)
3. **Veränderungen des Bruchverhaltens (→ cm-Skala)**

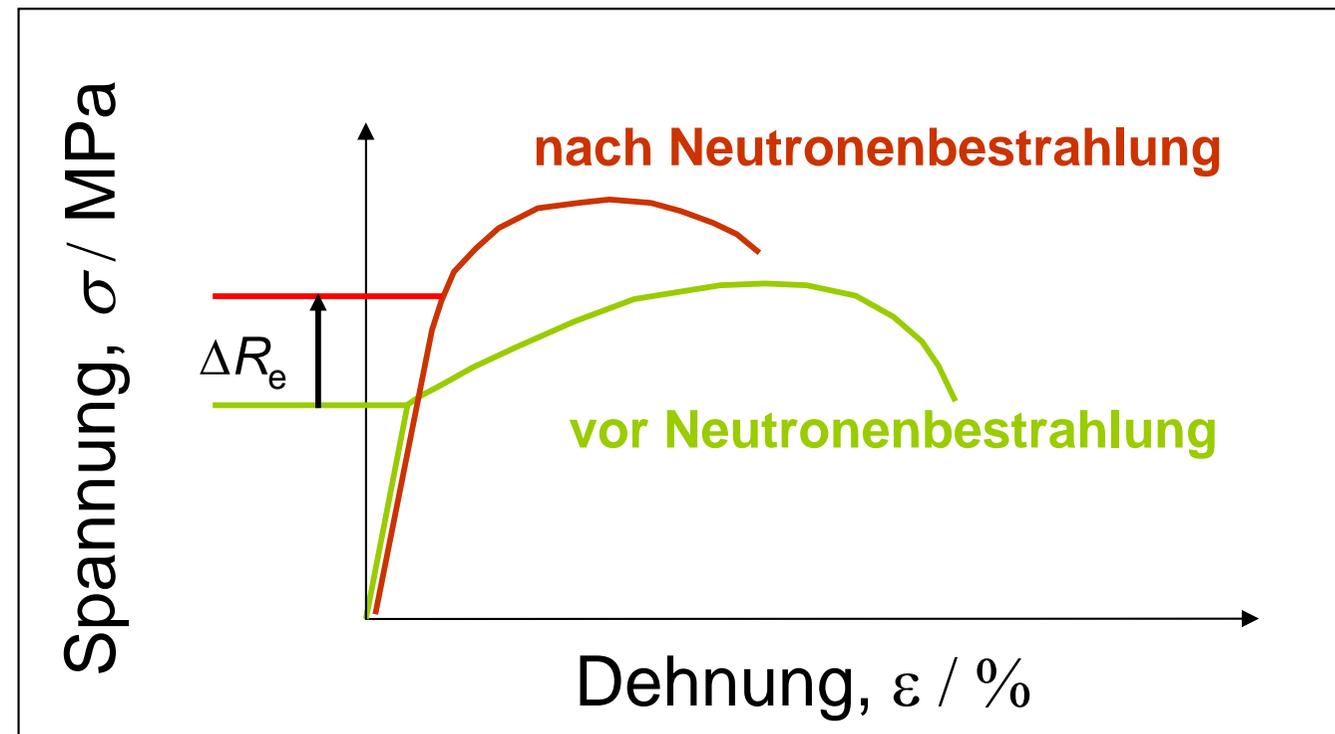
Fazit

Einfluss der bestrahlungsinduzierten Defektcluster auf die Spannungs-Dehnungs-Kurve des Stahls

Zugversuch



Spannungs-Dehnungs-Kurve

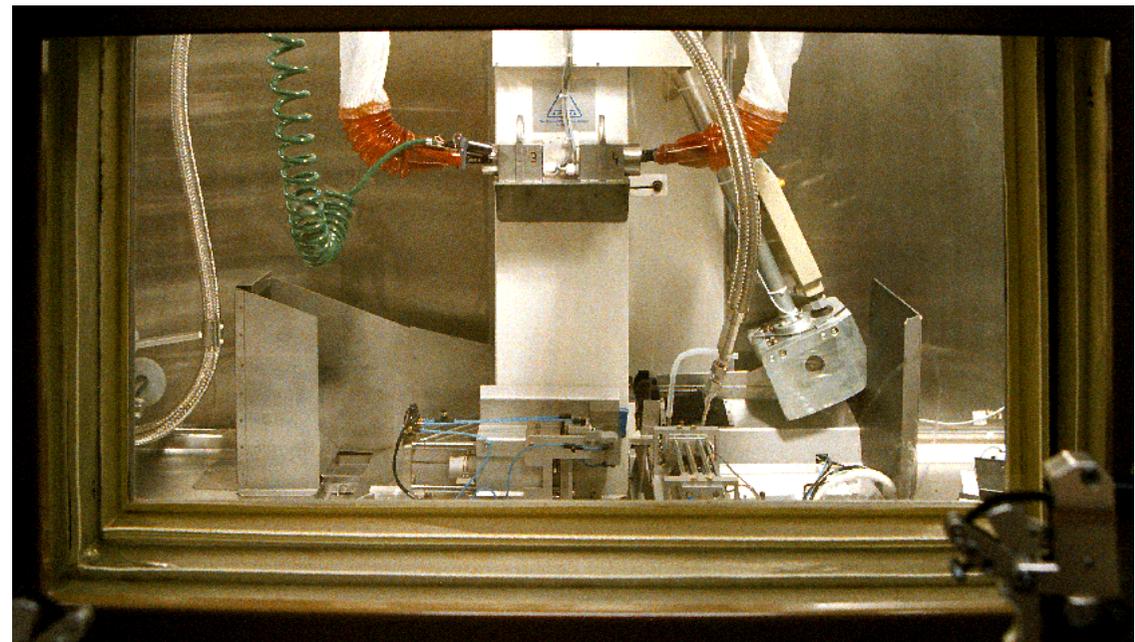


Kerbschlagbiegeversuch

Heiße Zellen

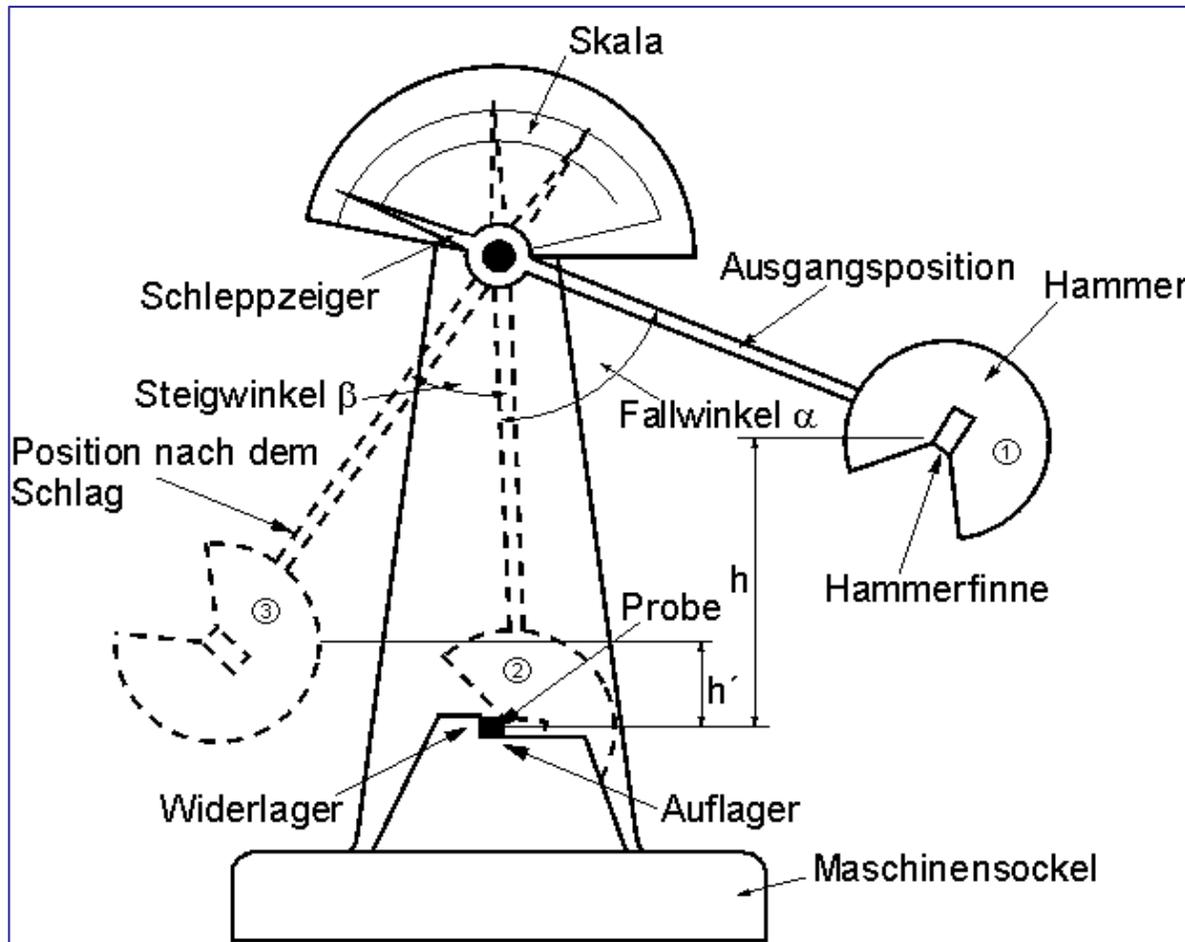


Kerbschlagpendel in heißer Zelle

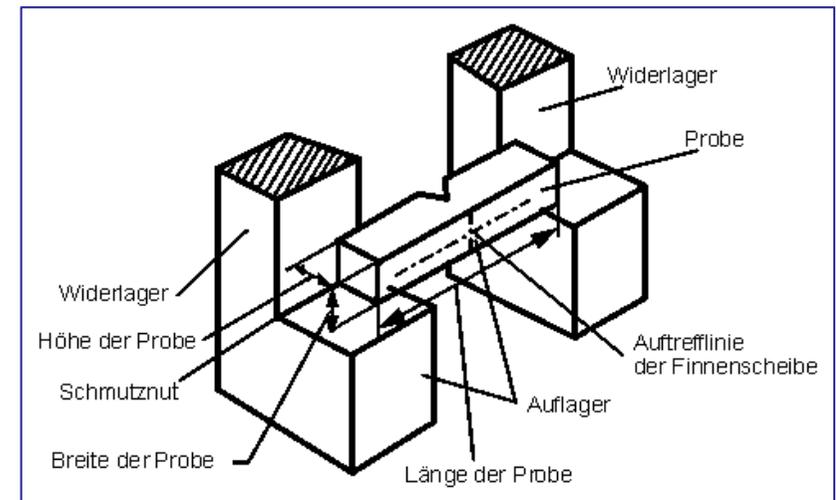


Kerbschlagbiegeversuch

Schema eines Pendels



Probe und Auflager



Kerbschlagbiegeversuch

1) Anfangshöhe der Hammerfinne über der Probe ist h .
Wie groß ist die potentielle Energie des Hammers?

$$E_{pot} = mgh$$

2) Die Steighöhe nach Durchschlagen der Probe ist h' .
Welche Kerbschlagarbeit A_V wurde geleistet?

$$A_V = mg(h - h')$$

3) Wie groß ist die kinetische Energie des Hammers
beim Auftreffen auf die Probe?

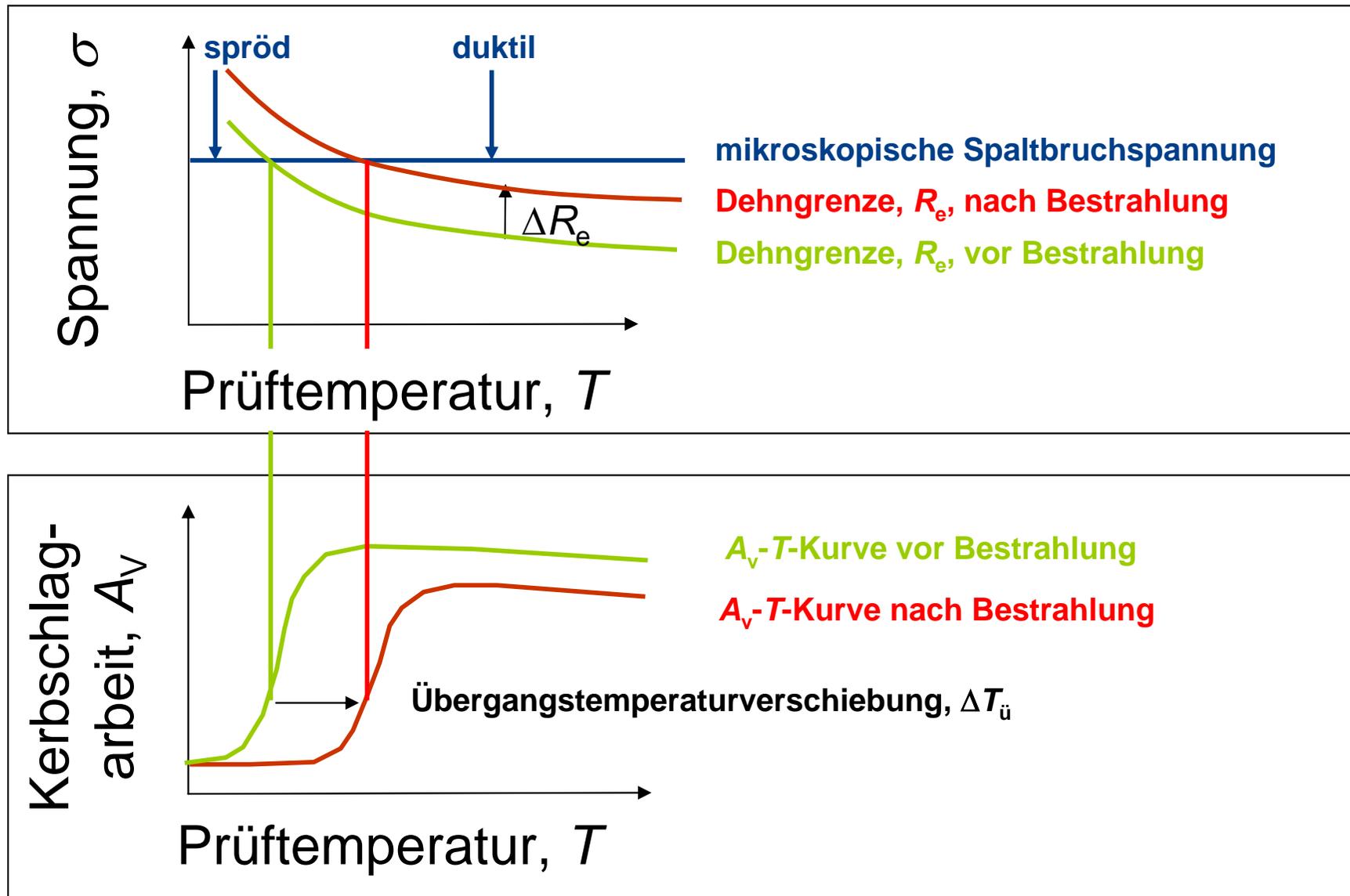
$$E_{kin} = \frac{m}{2} v^2$$

4) Bestimme die Aufprallgeschwindigkeit des Hammers
auf die Probe (v).

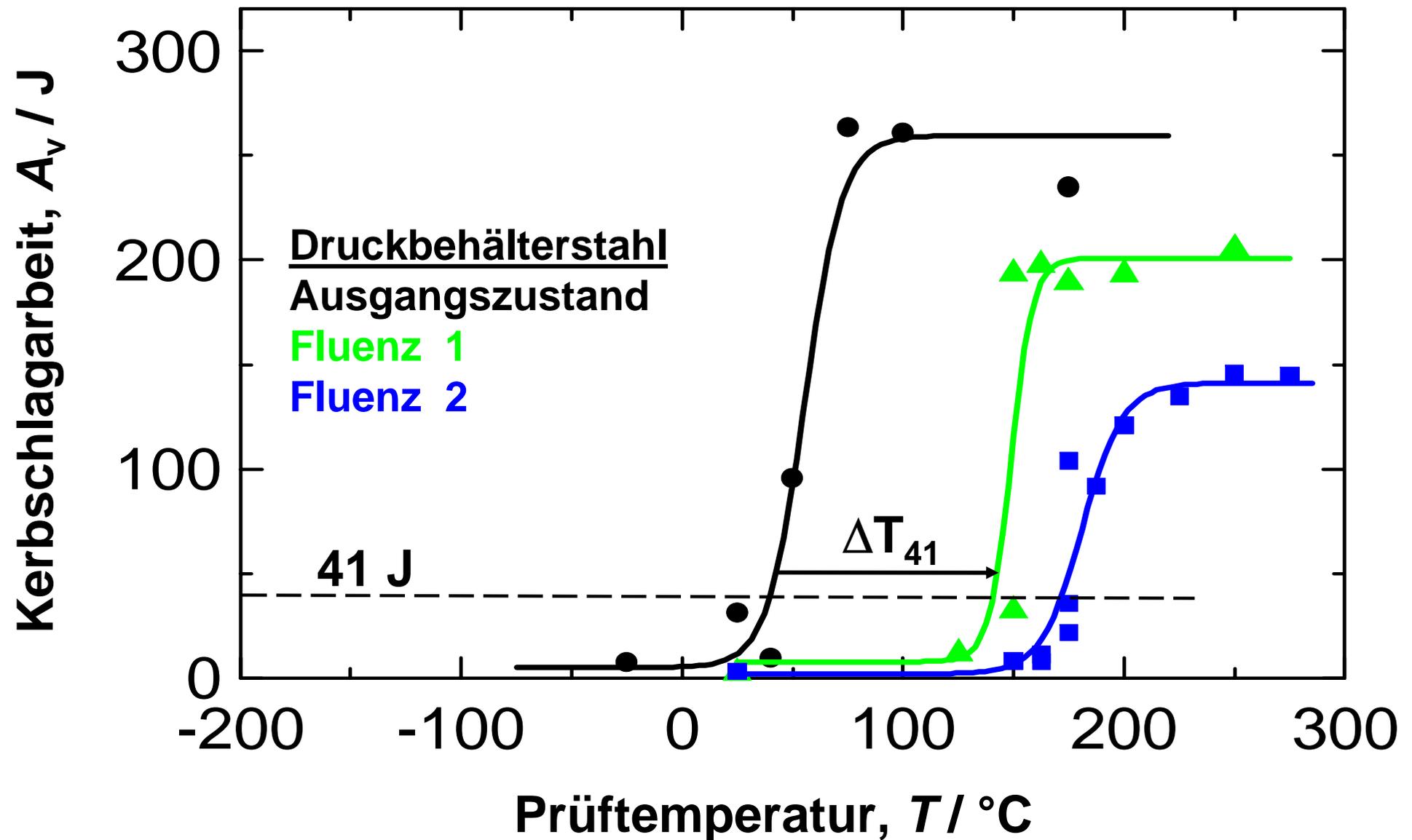
$$E_{pot} = E_{kin}$$
$$\Rightarrow v = \sqrt{2gh}$$

m ... Hammermasse, g ... Erdbeschleunigung, h ... Höhe

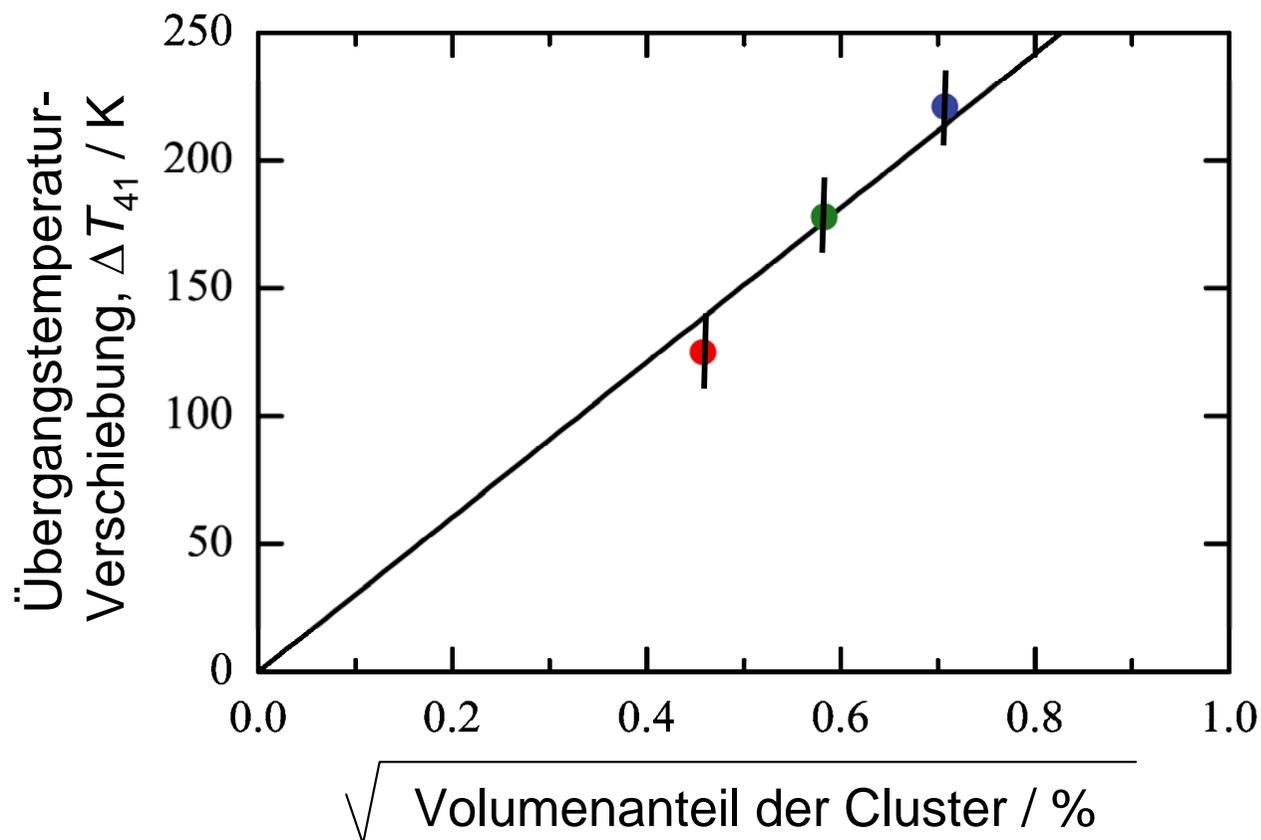
Spröd-duktil-Übergang



Spröd-duktil-Übergang



Spröd-duktil-Übergang



- (1) Bestrahlungsinduzierte Bildung von Defekt-Fremdatom-Clustern
- (2) Behinderung des Gleitens von Versetzungen
- (3) Erhöhung der Dehngrenze (Verfestigung)
- (4) Verschiebung der Spröd-duktil-Übergangstemperatur (Versprödung)

Gliederung

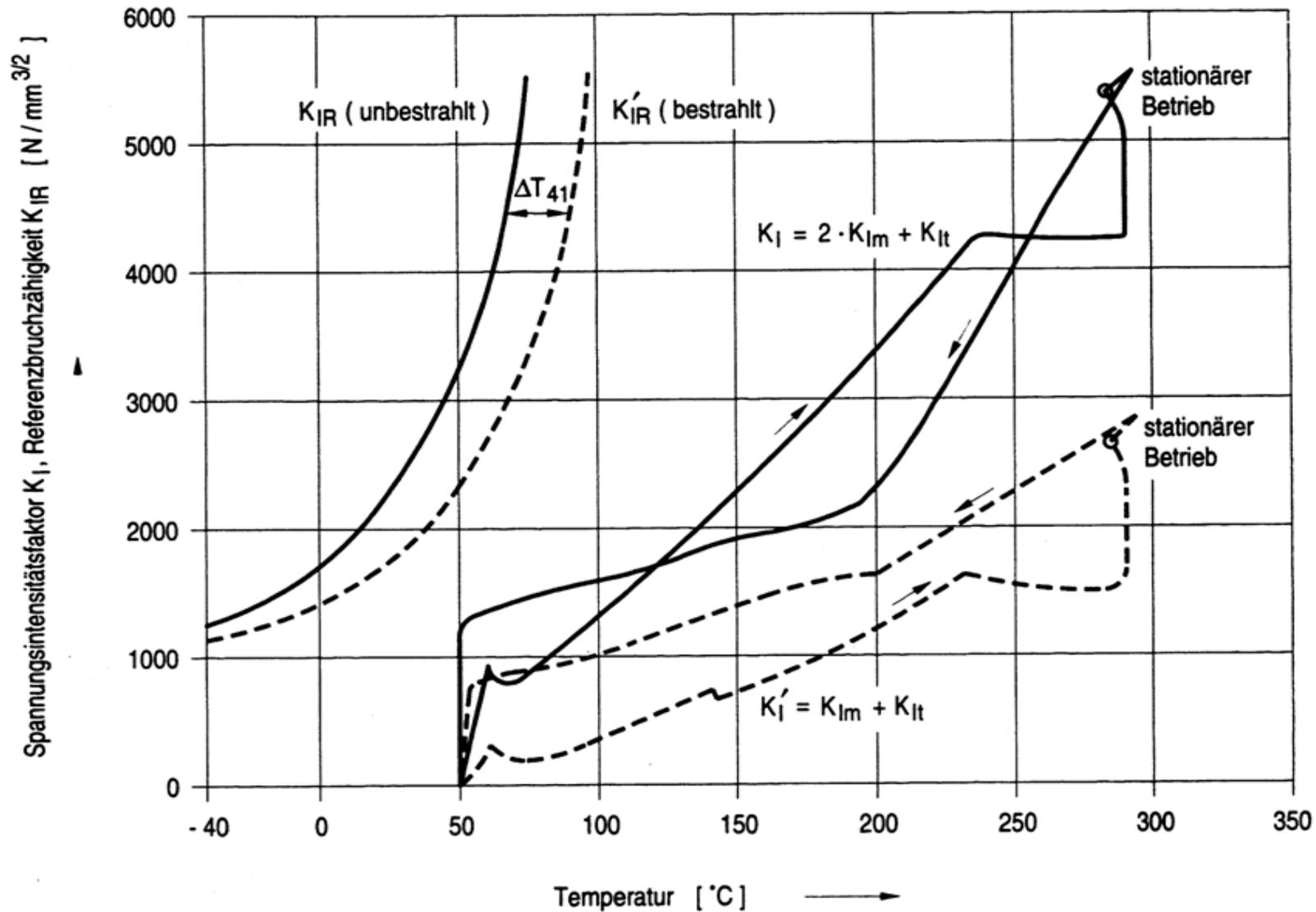
Einleitung

1. Bildung von Defekt-Fremdatom-Clustern (→ nm-Skala)
2. Behinderung der plastischen Verformung (→ μm -Skala)
3. Veränderungen des Bruchverhaltens (→ cm-Skala)

Fazit

Spröd-duktil-Übergang / Fahrtdiagramm

KTA 3201.2 Seite 41



Wie geht man vor?

(1) Maßnahmen zum Ausschluss von Sprödbruch.

- Voreilprobenprogramme

Bergner, F.; Ulbricht, A.; Hein, H.; Kammel, M.

Flux dependence of cluster formation in neutron-irradiated weld material

Journal of Physics: Condensed Matter 20 (2008) 104262

- Ausheilung des RDB

Ulbricht, A.; Bergner, F.; Böhmert, J.; Valo, M.; Mathon, M.-H.; Heinemann, A.

SANS response of VVER440-type weld material after neutron irradiation, post-irradiation annealing and reirradiation

Philosophical Magazine 87 (2007) 1855-1870

- Entwicklung neuer Werkstoffe

Heintze, C., Recknagel, C., Bergner, F., Hernández-Mayoral, M., Kolitsch, A.

Ion-irradiation-induced damage of steels characterized by means of nanoindentation **Nuclear**

Instruments and Methods in Physics Research B (2009) in Druck

(2) Verstehen, was abläuft.

