

# Ionenstrahlglättung von Si-Oberflächen: Grundlagen ~~und Anwendungen~~

Frank Frost und Bashkim Ziberi

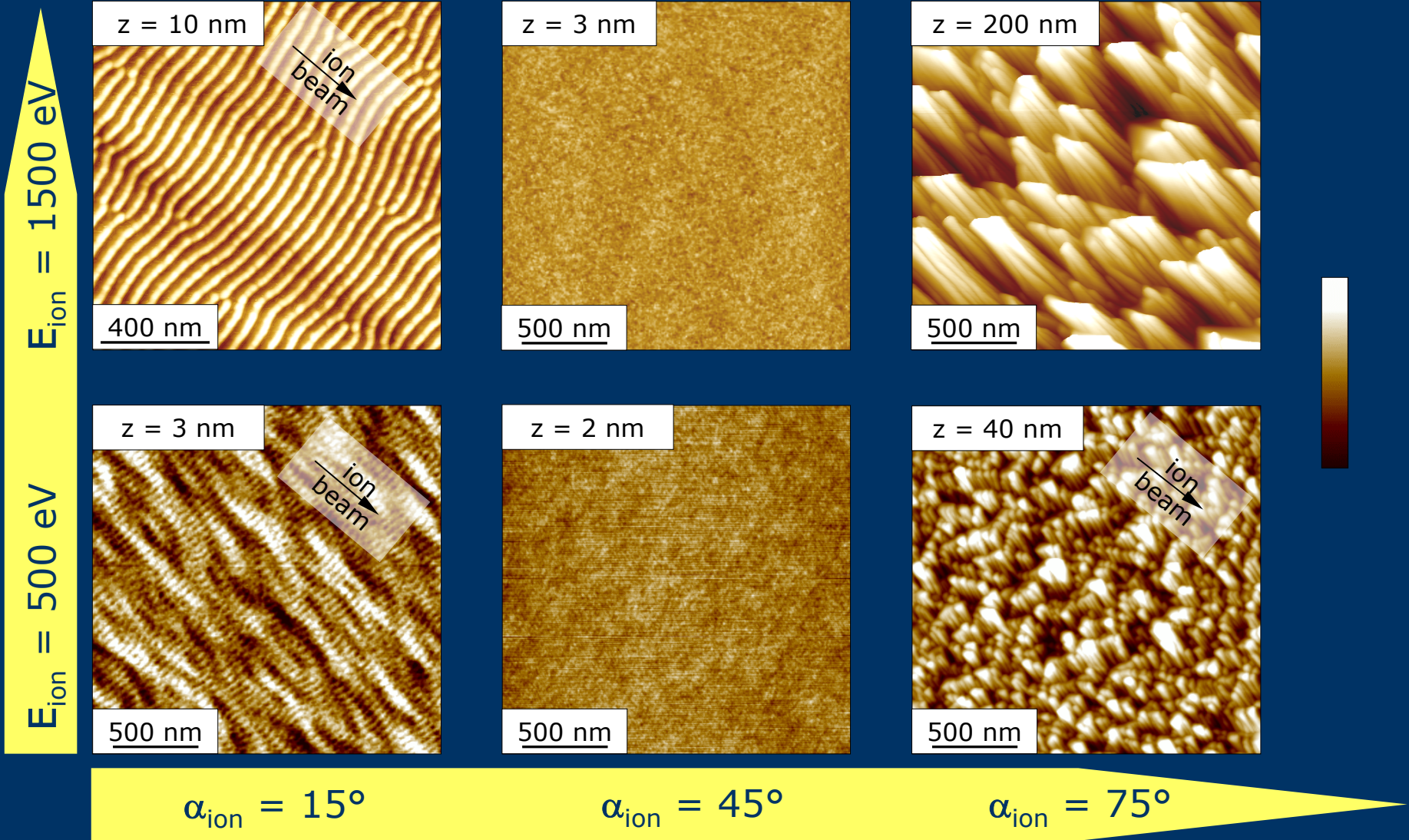
Leibniz-Institut für Oberflächenmodifizierung e. V.

Permoserstr. 15, D-04318 Leipzig  
frank.frost@iom-leipzig.de  
www.iom-leipzig.de

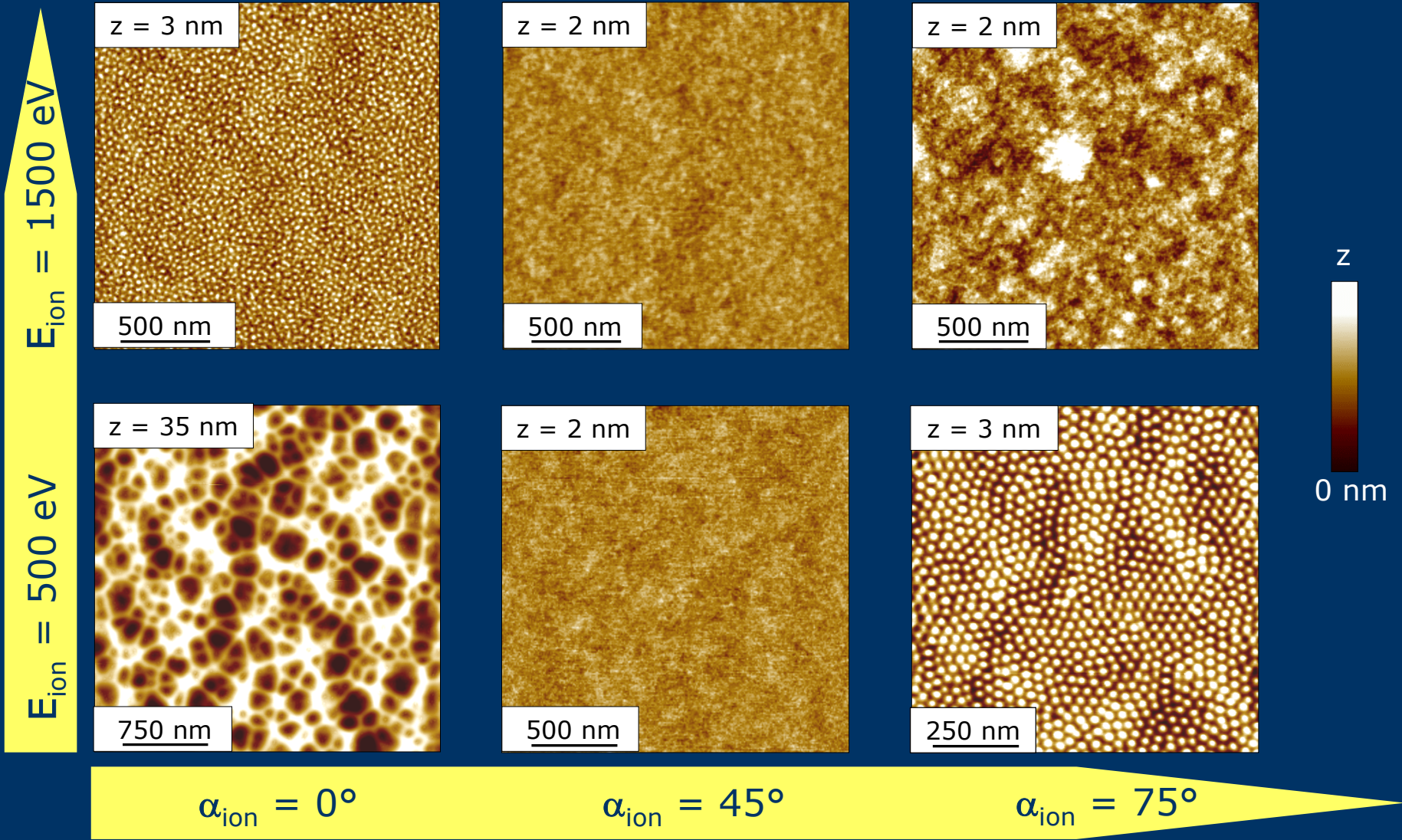
- Motivation
- Überblick zur Entwicklung von Si-Oberflächen bei der niederenergetischen Ionenstrahlerosion
- (lineares) Modell zur Entstehung spezifischer Oberflächentopographien
- Aufklärung der dominierenden Relaxationsprozesse
- Schlussfolgerungen

- komplexe Prozesse bei der Ionenstrahlerosion von Festkörperoberflächen: Aufrauhung, Glättung, Musterbildung, ...
- $\text{Ar}^+ \longrightarrow \text{Si}$ : einfaches aber auch technologische bedeutendes Modellsystem
- Verständnis der grundlegenden Prozesse unvollständig
- Optimierung und Anpassung der Ionenstrahl(direkt)glättung an technologische und ökonomische „Randbedingungen“

# Überblick (I): niederenergetische Ionenerosion von Si



# Überblick (II): niederenergetische Ionenerosion von Si



# Modellierung der OF-Entwicklung: Kontinuumsansatz

lineares  
Bradley-Harper-Modell

nichtlineare +  
stochastische Erweiterung

$$\frac{\partial h(\vec{r}, t)}{\partial t} = S \nabla^2 h(\vec{r}, t) - D \nabla^4 h(\vec{r}, t) + \frac{\lambda}{2} (\nabla h(\vec{r}, t))^2 + \eta(\vec{r}, t)$$

Krümmungsabhängigkeit der lokalen Abtragsrate

Relaxation der Oberfläche: therm. aktivierte Diffusion  
viskoser Fluss ( $d_{\text{amorph}} < \lambda$ )  
„surface erosion smoothing“

Nichtlinearität durch winkelabhängige Erosionsrate

Stochastik: „Sputterauschen“

# Lineares Modell ( $\lambda = 0$ )

---

$$|h(q, t)|^2 = PSD(q = 2\pi f, t) =$$
$$PSD_0(q) \times \exp\{- (Vq + Sq^2 + Dq^4)t\} + A \frac{1 - \exp\{- (Vq + Sq^2 + Dq^4)t\}}{Vq + Sq^2 + Dq^4}$$

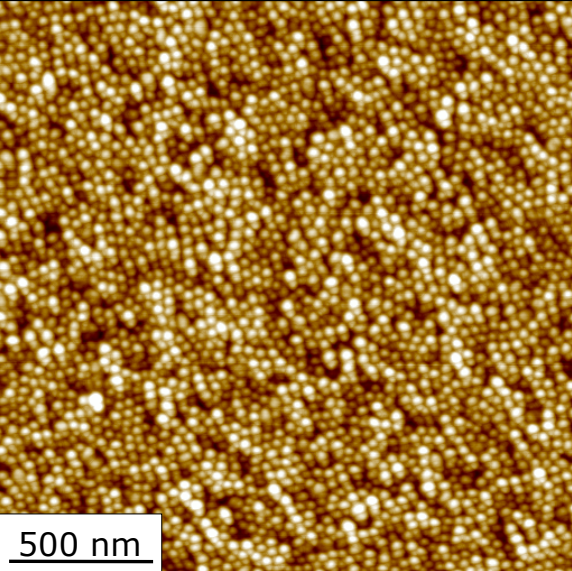
Eigenschaften der "power spectral density function"  $PSD(f, t)$  :

- $\int PSD(f, t) 2\pi f df = R_q^2(t) \dots$  rms - Rauheit
- wenn Glättung dominiert ( $Vq + Sq^2 + Dq^4 > 0$ ) :

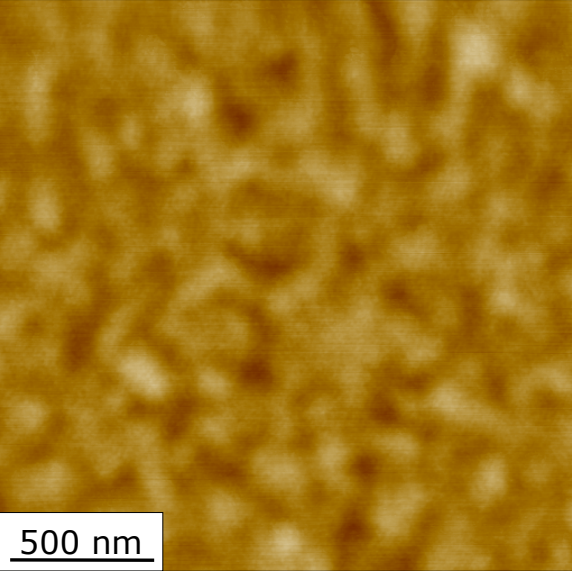
$$PSD(f, t \rightarrow \infty) \rightarrow A / (Vq + Sq^2 + Dq^4)$$

# Kinetik der Glättung

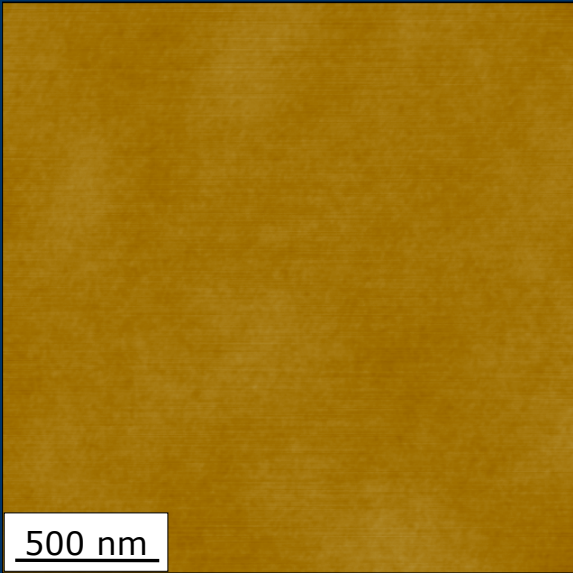
## Ausgangsoberfläche



t = 10 min



t = 180 min



15 nm

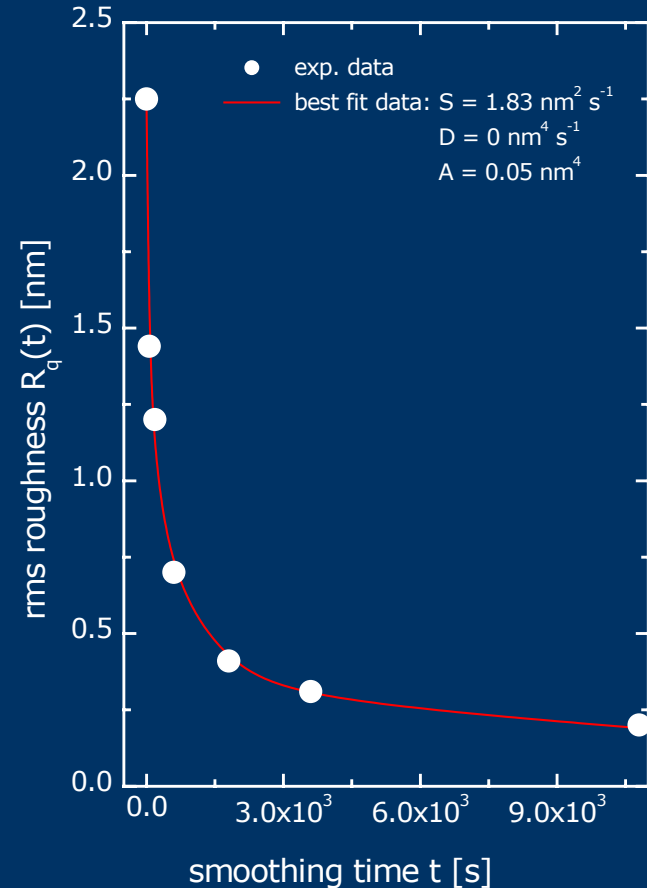
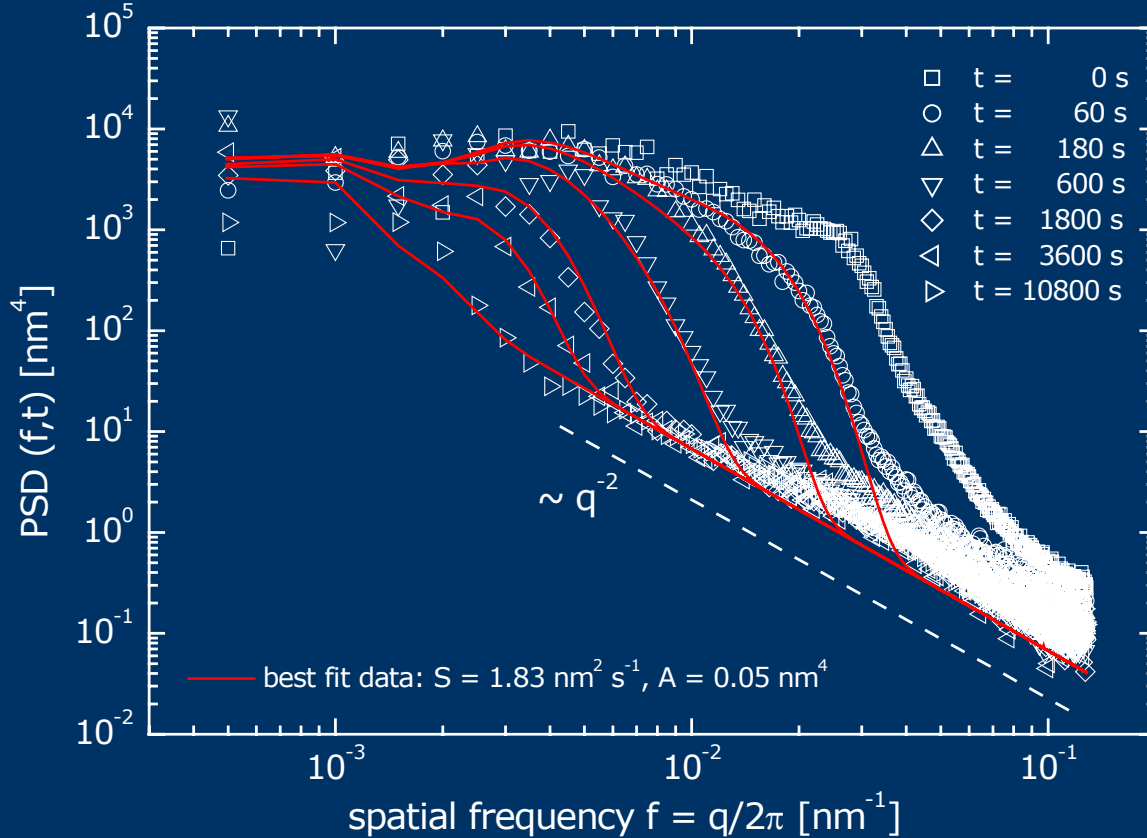


0 nm

$Ar^+$ ,  $E_{ion} = 500 \text{ eV}$ ,  $\alpha_{ion} = 45^\circ$ ,  
 $j_{ion} = 300 \mu\text{Acm}^{-2}$ , Rotation



# Kinetik der Glättung



$$PSD(f, t \rightarrow \infty) = \frac{A}{Sq^2} \sim q^{-2} \quad \text{krümmungsabhängige Relaxation?}$$


# Krümmungsabhängige Relaxation

## 1. Krümmungsabhängige Abtragsrate:

$$S = \frac{j_{ion} a}{N} \gamma(\alpha_{ion}) [\Gamma_1(\alpha_{ion}) + \Gamma_2(\alpha_{ion})] (= ER \times a [\Gamma_1(\alpha_{ion}) + \Gamma_2(\alpha_{ion})]) < 0 \text{ für } \alpha_{ion} < 50^\circ$$

## 2. Ballistische Drift\*:

atomare Drift parallel zur Oberfläche durch Impulseintrag ( $\alpha_{ion} > 0^\circ$ )


$$F(s) = j_{ion} \cos(\alpha_{ion} - \gamma) f(E) d \sin(\alpha_{ion} - \gamma)$$
$$S = \frac{j_{ion}}{N} f(E) d \cos(2\alpha_{ion})$$

## 3. Krümmungsabhängige Relaxation:

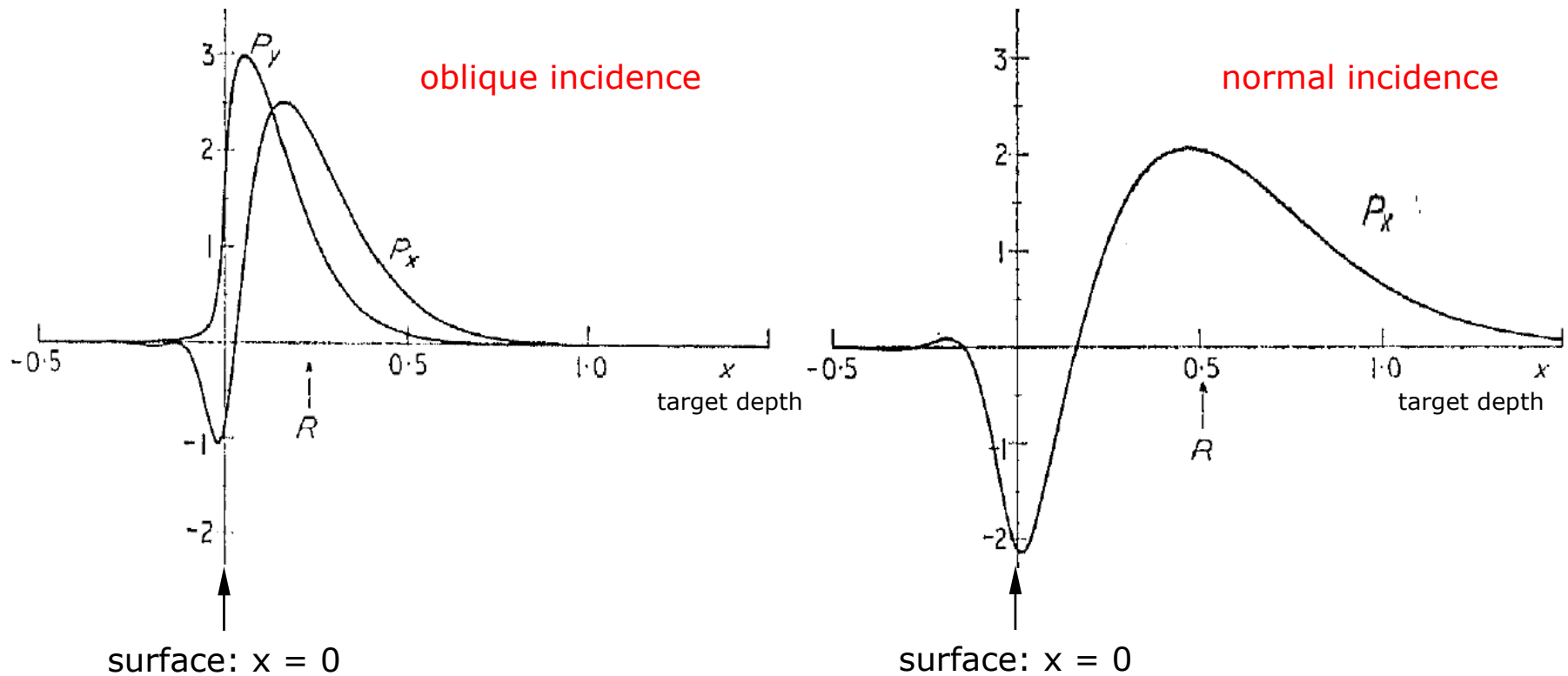
$$S = \frac{j_{ion}}{N} [f(E) d \cos(2\alpha_{ion}) + a \gamma(\alpha_{ion}) \Gamma_{av}(\alpha_{ion})]$$

\* G. Carter, PRB 1996, Vacuum 1998

# Krümmungsabhängige Relaxation

Momentum deposition by heavy ion bombardment (Littmark & Sigmund 1975)

$P_x, P_y$ : momentum density normal/parallel to surface



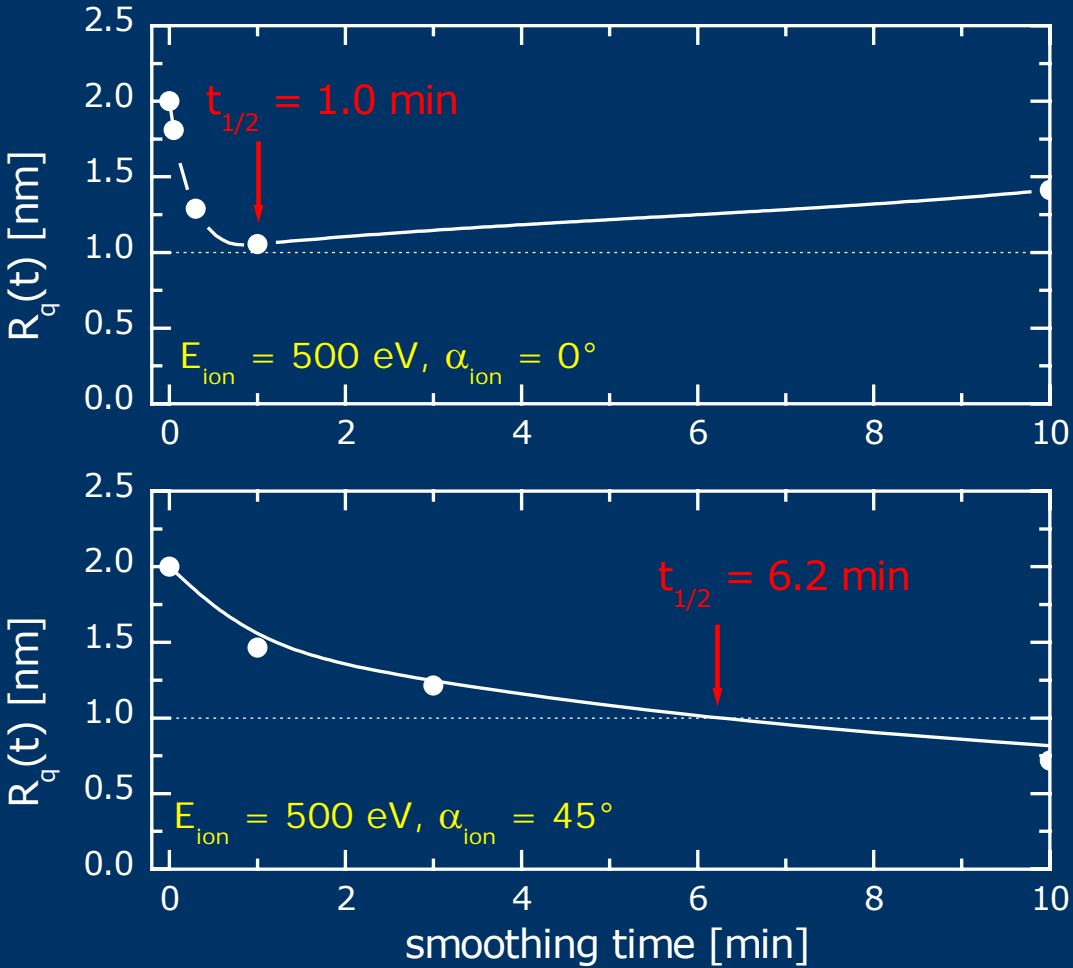
# Krümmungsabhängige Relaxation: Einfluss von $\alpha_{ion}$

$$S(\alpha_{ion}) = \frac{j_{ion}}{N} \left[ f(E)d \cos(2\alpha_{ion}) + \underbrace{a(\alpha_{ion})Y(\alpha_{ion})\Gamma_{av}(\alpha_{ion})}_{g(\alpha_{ion}) \approx const.} \right]$$

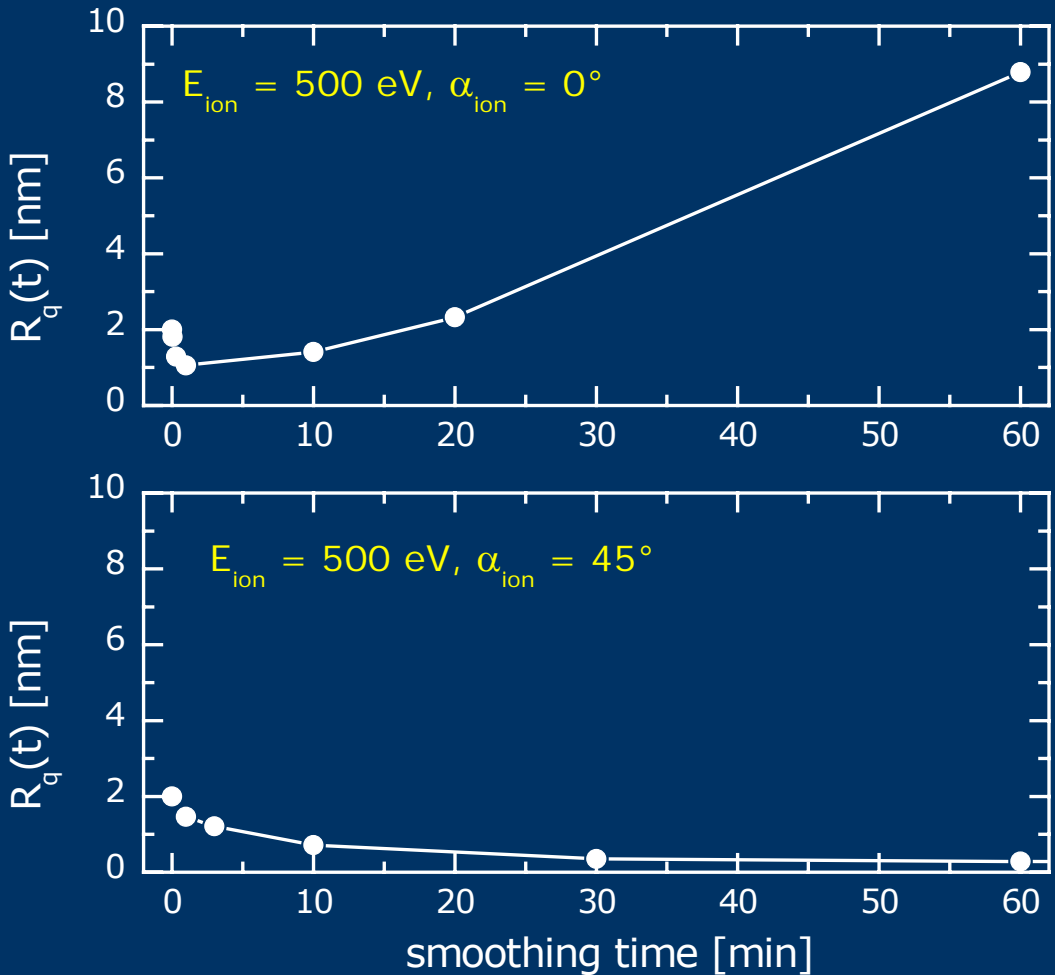
$$PSD(q, t) = PSD_0 \times \exp\{-Sq^2t\} + A \frac{1 - \exp\{-Sq^2t\}}{Sq^2}$$

$$\text{Relaxationszeit: } T_R = 1/Sq^2 \sim 1/\cos(2\alpha_{ion})$$

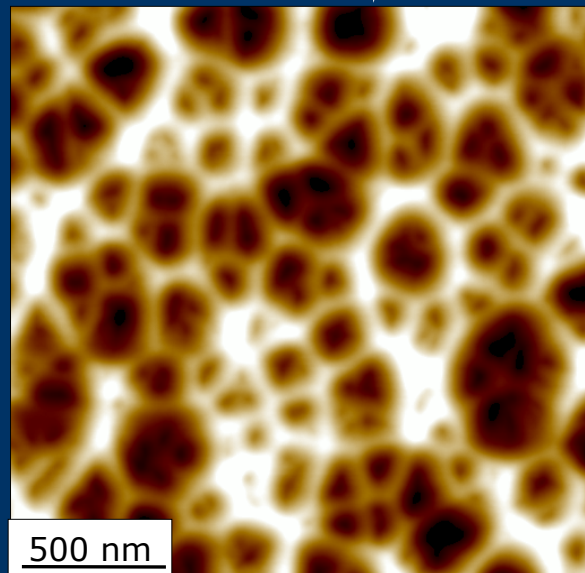
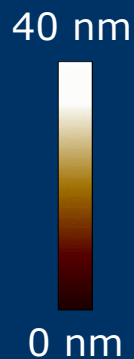
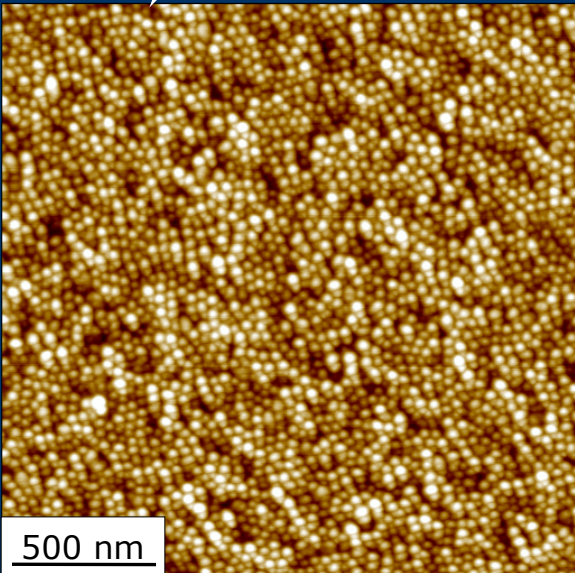
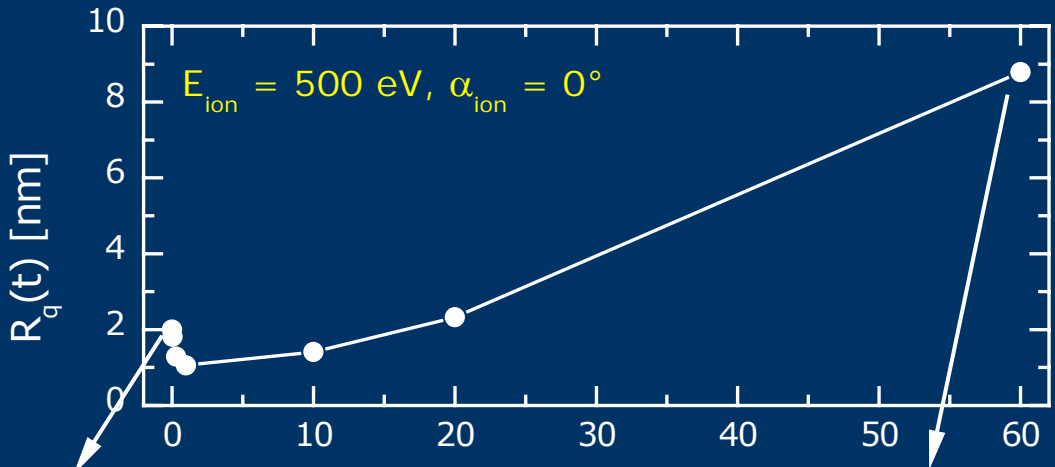
# Krümmungsabhängige Relaxation: Einfluss von $\alpha_{ion}$



# Krümmungsabhängige Relaxation: Einfluss von $\alpha_{ion}$



# Krümmungsabhängige Relaxation: Einfluss von $\alpha_{ion}$



# Ballistische Drift ohne ballistische Diffusion?

## 1. Ballistische Drift:

gerichtete atomare Drift parallel zur Oberfläche durch Impulseintrag ( $\alpha_{ion} > 0$ )

$$S = \frac{j_{ion}}{N} f(E) d \cos(2\alpha_{ion})$$

## 2. Ballistische Diffusion:

ungerichtete Bewegung von rückgestoßenen Atomen transversal zur Einschubrichtung

$$\langle d \rangle = 0$$

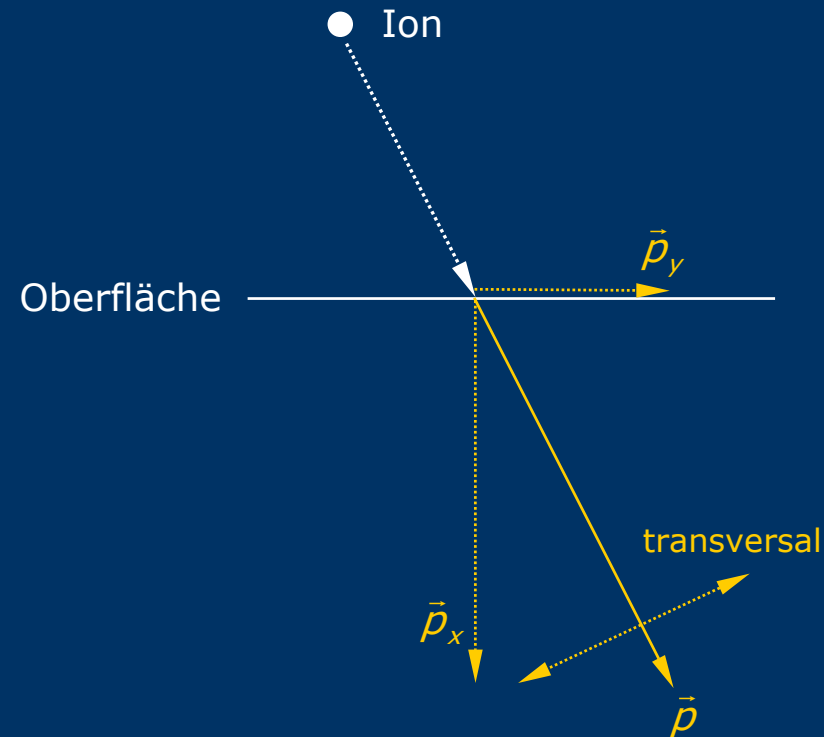
aber

$$\langle d^2 \rangle \neq 0$$

$$D = \frac{j_{ion} 0.067 F_{n0} d^2 n a \Gamma_{av}(\alpha_{ion})}{N E_d}$$

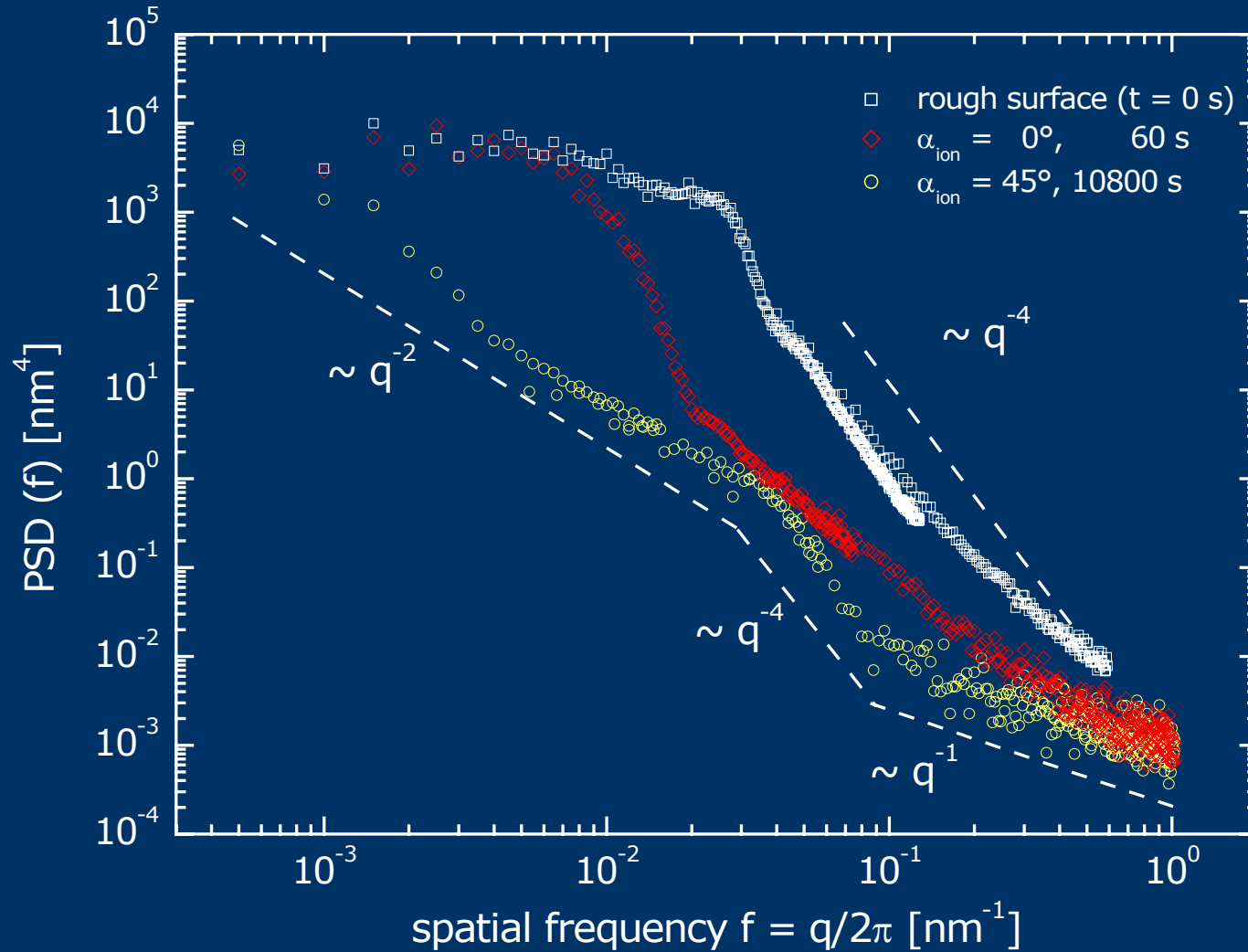


$$D/S \sim \cos(\alpha_{ion}) / \cos(2\alpha_{ion})$$





# Ballistische Drift und ballistische Diffusion



# (Einige) Schlussfolgerungen

---

## Allgemein:

- niederenergetische ( $\text{Ar}^+$ )-Ionenstrahlen sind ein geeignetes Werkzeug zur Glättung von Oberflächen (Si, Quarz, versch. Halbleiter, SiC, Cu, Diamant, ...)
- minimal erreichbare Rauheit bei Glättung ist bestimmt durch die Stochastik des Erosionsprozesses, bei ballistische Drift als dominierenden Relaxationsprozeß gilt:

$$R_q(t \rightarrow \infty) = \sqrt{A/S} \ln\left(\frac{f_{\max}}{f_{\min}}\right)$$

## Speziell für Si:

- atomare Drift ist ein sehr effektiver Glättungsprozess für kleine Ortsfrequenzen:

$$\text{z.B: } D = S, f = 10^{-3} \text{ nm}^{-1} \rightarrow T_R(\text{Drift}) / T_R(\text{Diffusion}) = 10^{-6}$$

- ballistische Drift als Relaxationsprozeß ist am effektivsten für senkrechten Ioneneinfall (technologisch günstig)

aber: „parasitäre“ Prozesse