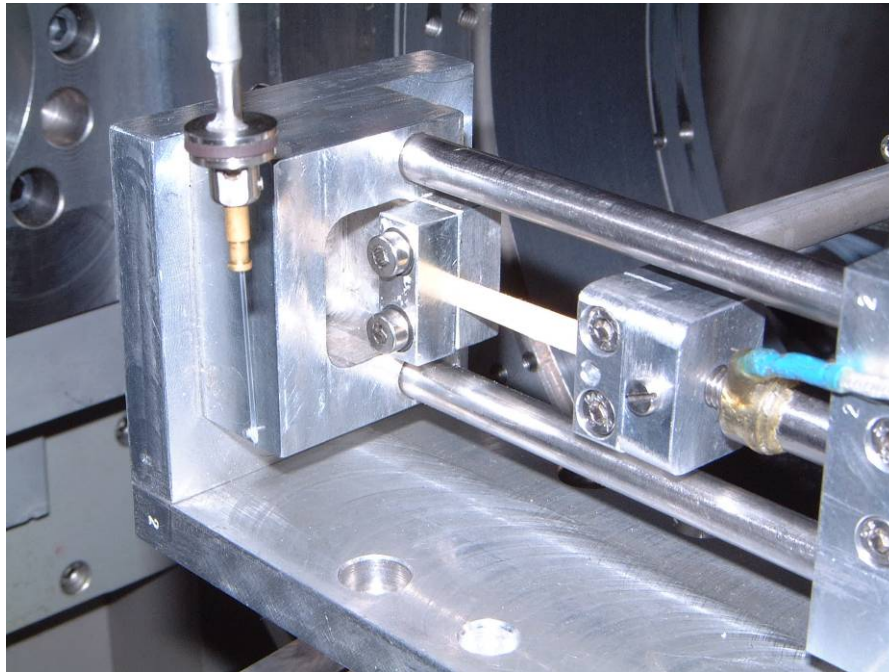


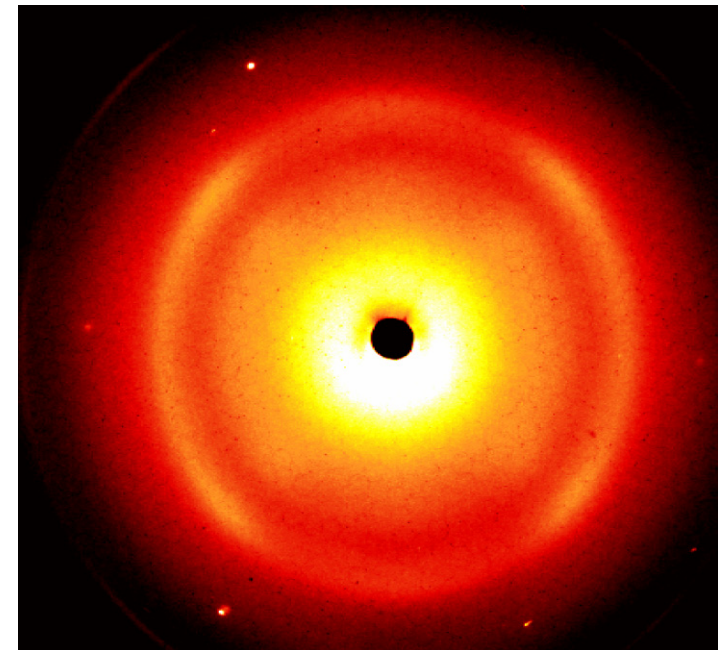
2.1.5 Mechanische Eigenschaften von Holz



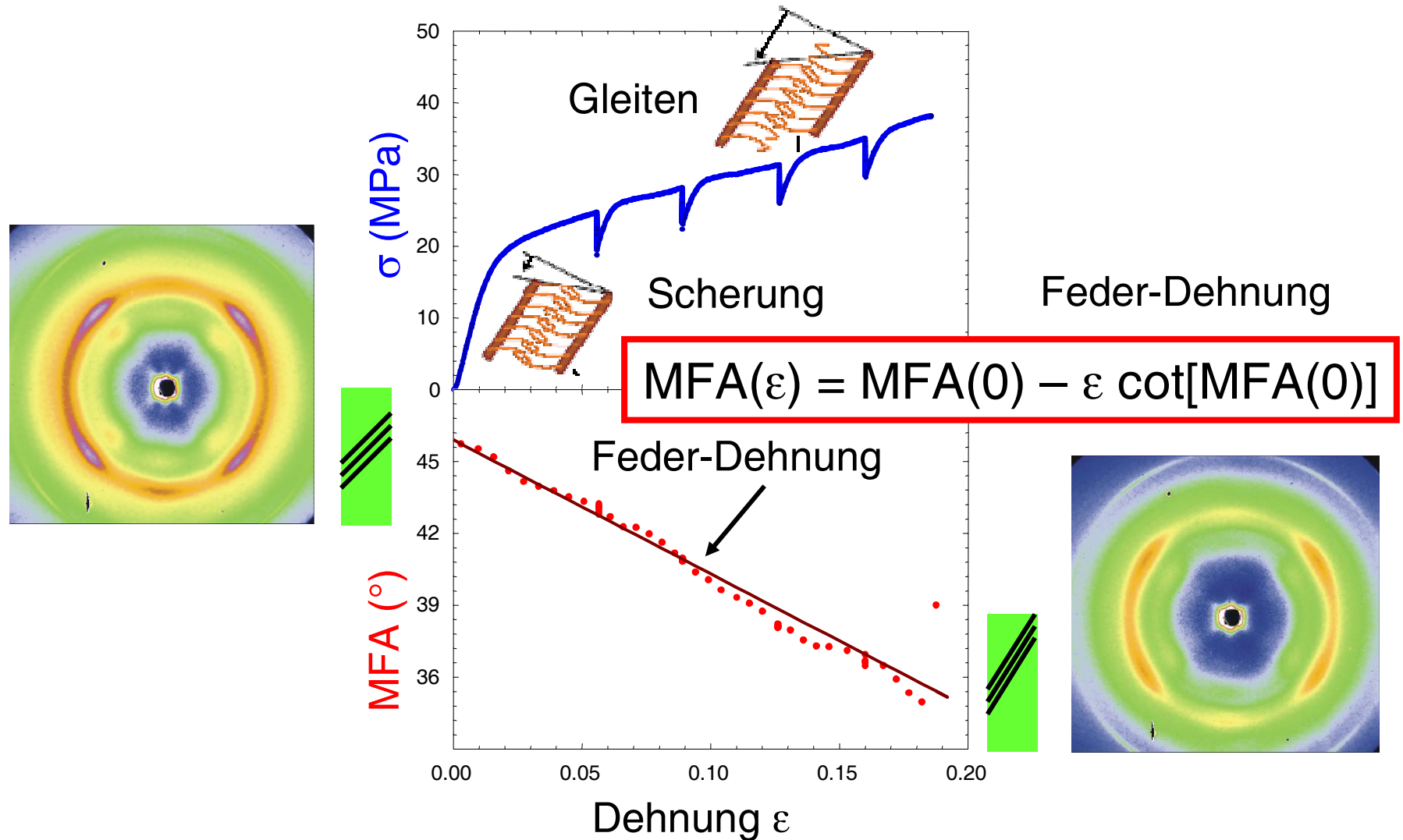
Experimente an Druckholz
(MFA = 46°)



MFA wird unter Zug kleiner!



Mikroskopischer Klettverschluss in Holz?





J. Keckes, I. Burgert, K. Frühmann, M. Müller, K. Kölln, M. Hamilton,
 M. Burghammer, S. V. Roth, S. Stanzl-Tschegg, P. Fratzl.
Nature Mater. **2**, 810-814 (2003)

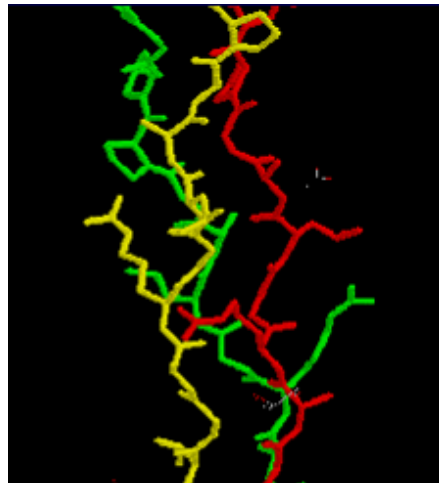
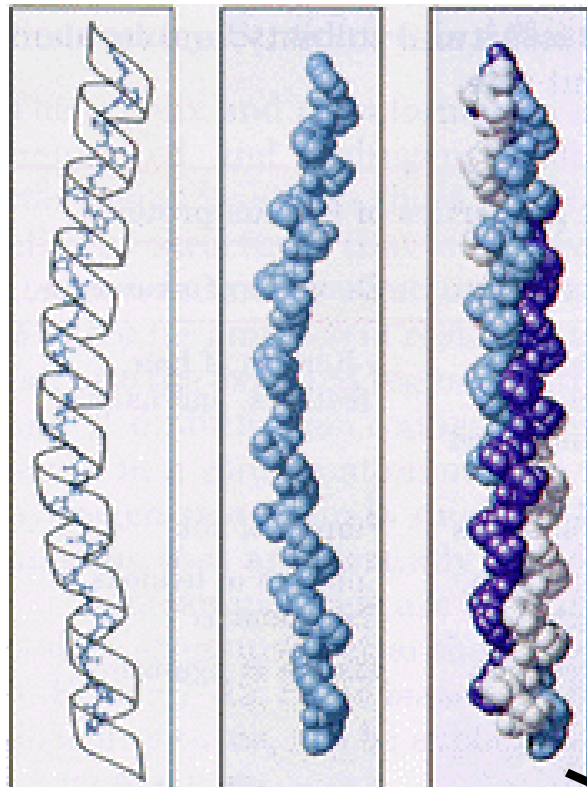
2.5 Collagen

- **häufigstes Protein** im menschlichen Körper:
Bindegewebe, Haut, Sehnen, Knochen ...
- Synthese in **Fibroblasten**: Sekretion, Modifikation, Selbstorganisation

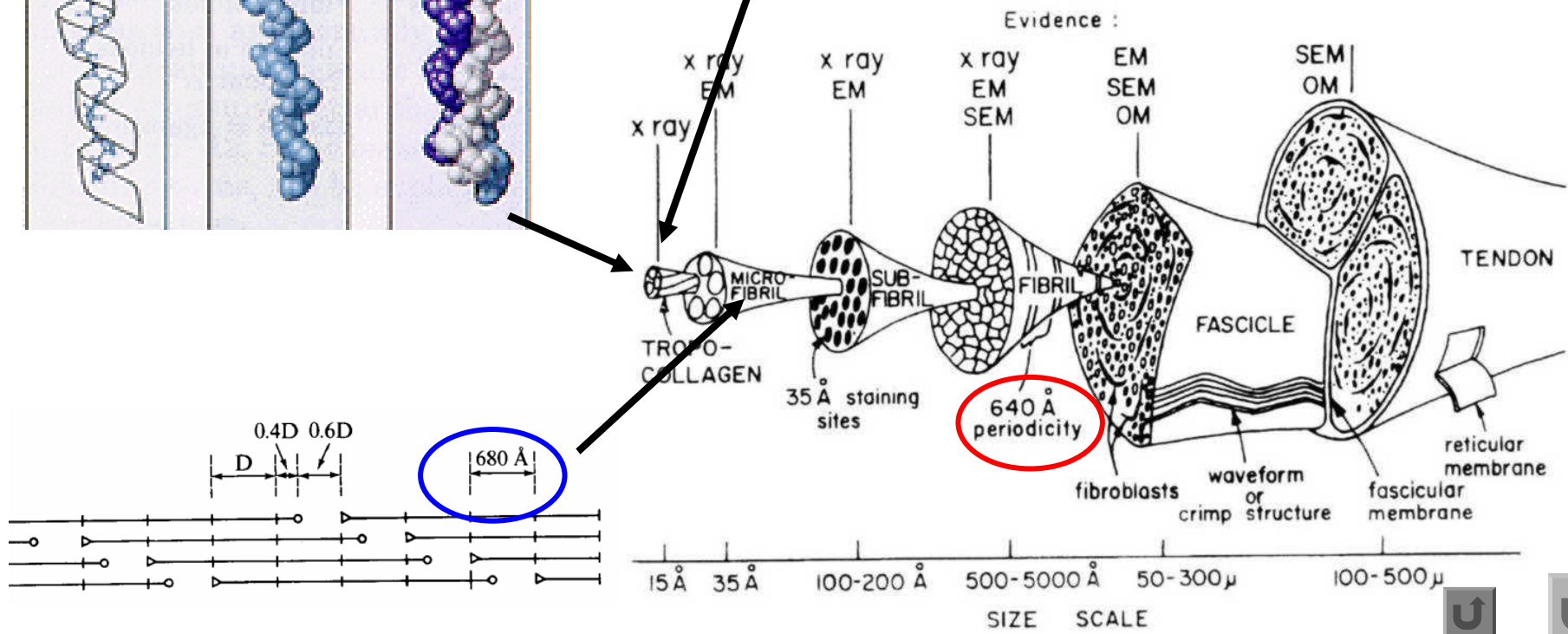
2.5.1 Struktur von Collagen

- wie üblich **hierarchisch**... 
- **Polypeptide**: regelmäßig jede 3. Aminosäure Glycin
Sequenz: Gly-Xaa-Yaa-Gly-Xaa-... (oft Prolin und Lysin) 
- 3 Polypeptide formen gemeinsame α -Helix: **Tropocollagen**
- Tropocollagen: 1.38 nm im Durchmesser, 300 nm lang
- intra- und intermolekulare Bindungen zur Stabilisierung

Struktur von Sehnen / Collagen

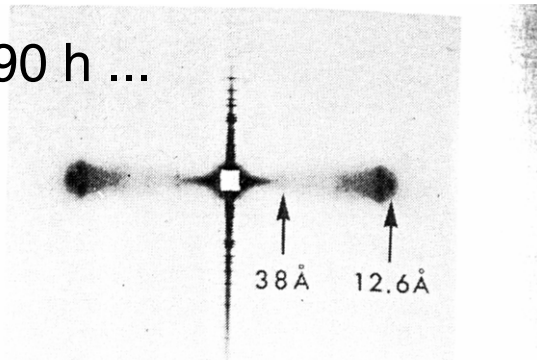


Stapelung von Tropocollagen:
 Periode von **64 nm (trocken)**
 bzw. **68 nm (naß)** aus
 Röntgenstreuung

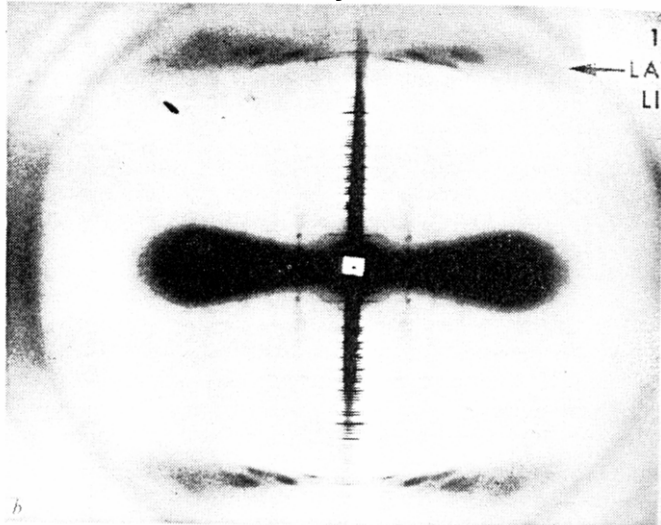


Röntgenstreuung an Collagen

1971, 90 h ...



A. Miller, J. S. Wray. *Nature* **230**, 437-439 (1971)

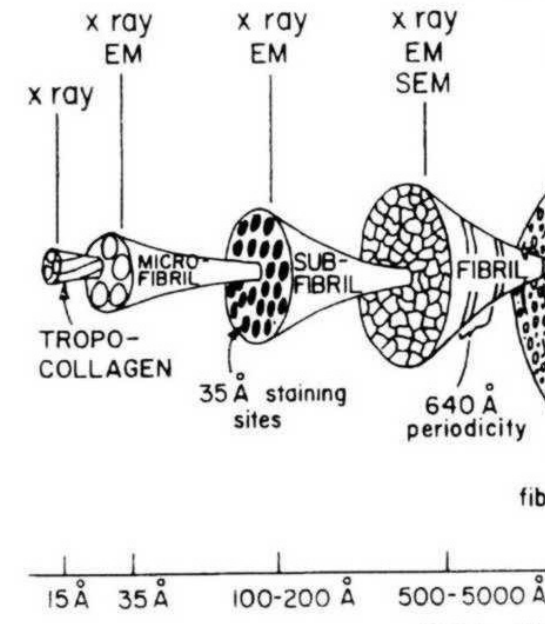


große Perioden

$$\Rightarrow \text{kleine } Q = \frac{2\pi}{d} = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \Theta$$

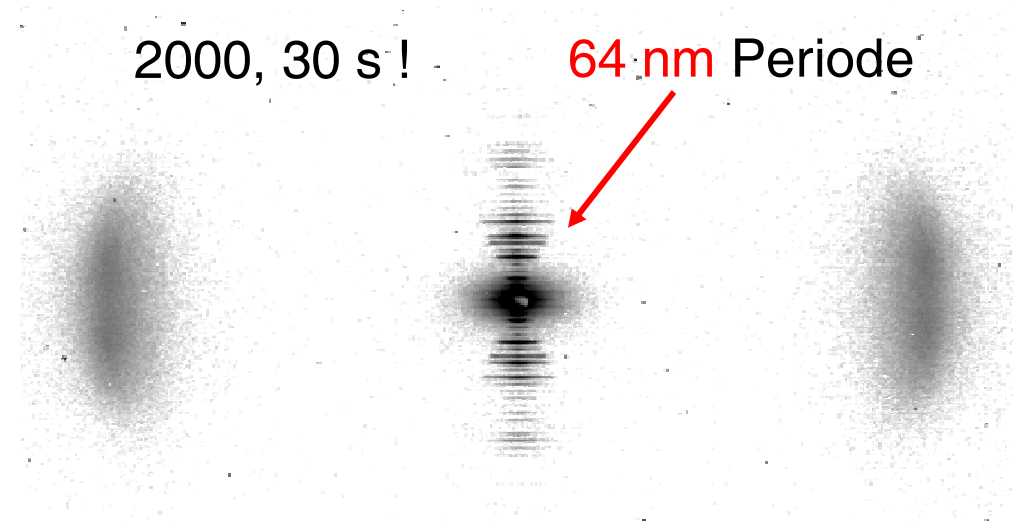
\Rightarrow kleine Winkel

„Kleinwinkelstreuung“



2000, 30 s !

64 nm Periode



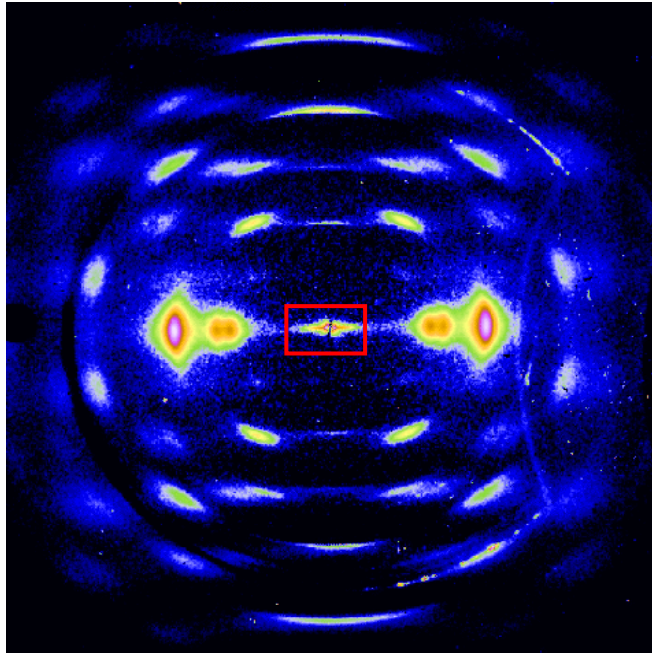
M. Müller, M. Burghammer, C. Riek. *Nucl. Instrum. Meth. A* **467-468**, 958-961 (2001)

M5: Kleinwinkelstreuung

- mit Röntgenstrahlung (**SAXS**) oder Neutronen (**SANS**)
- **Prinzip** wie bei Diffraktion: Form- und Strukturfaktor
- typische Dimensionen: 0,5 nm (Elementarzelle) bis 1 μm (Lichtstreuung!)
- Streuung an **Inhomogenitäten / Dichtefluktuationen**:
 - Poren
 - Ausscheidungen
 - Kolloide
 - Polymerstrukturen (Komposite!)
 - ...
- SAXS: Elektronendichte- } **Kontrast**
- SANS: Streulängendichte- }



(Zellulosefaser)



Diffraktion:

$$I(Q) = \left| \sum_l f(Q) e^{i\vec{Q} \cdot \vec{R}_l} \right|^2$$

Atomformfaktor,
Elektronenverteilung

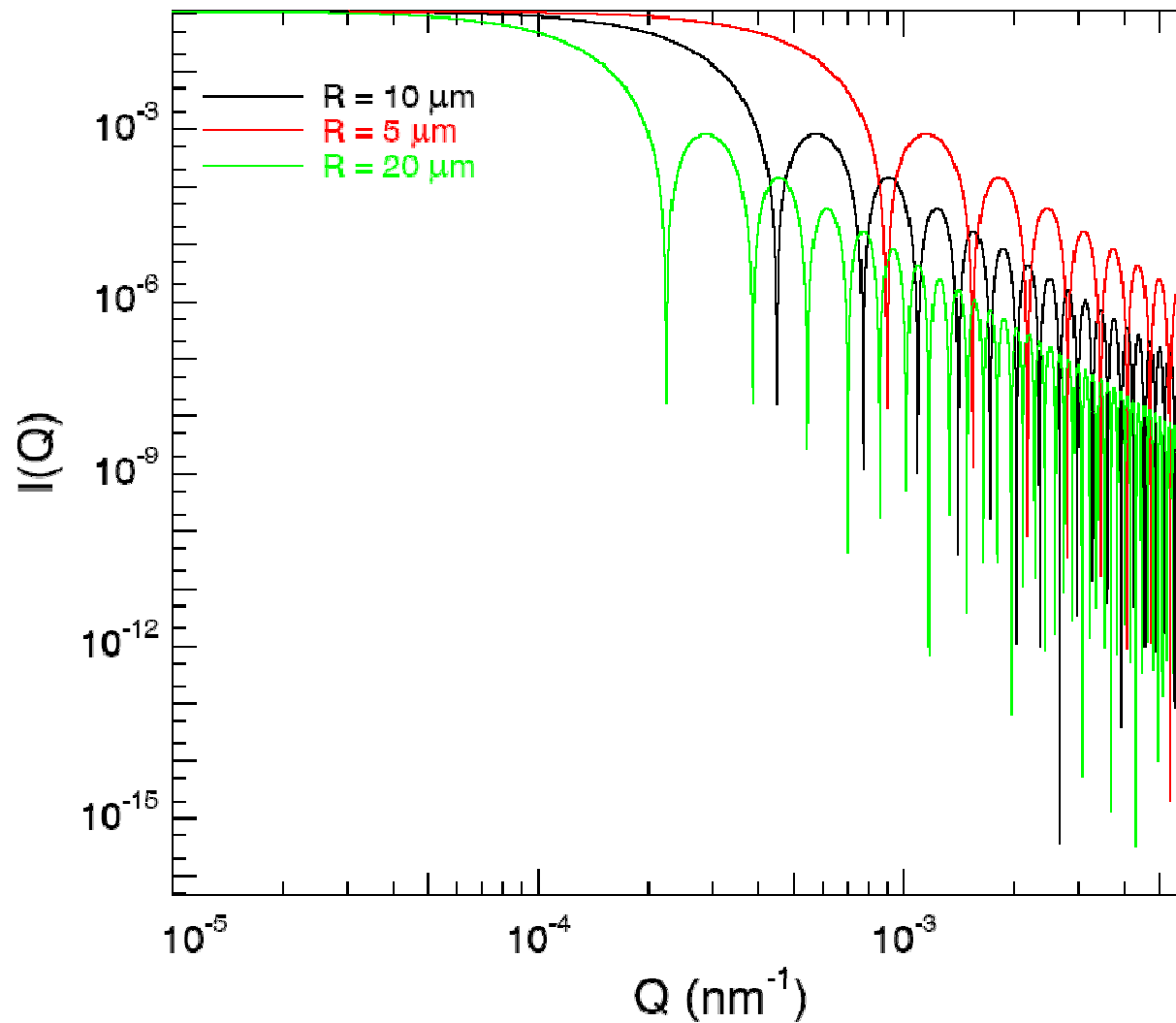
Gitter-Interferenz \Rightarrow
Braggreflexe

Kleinwinkelstreuung:

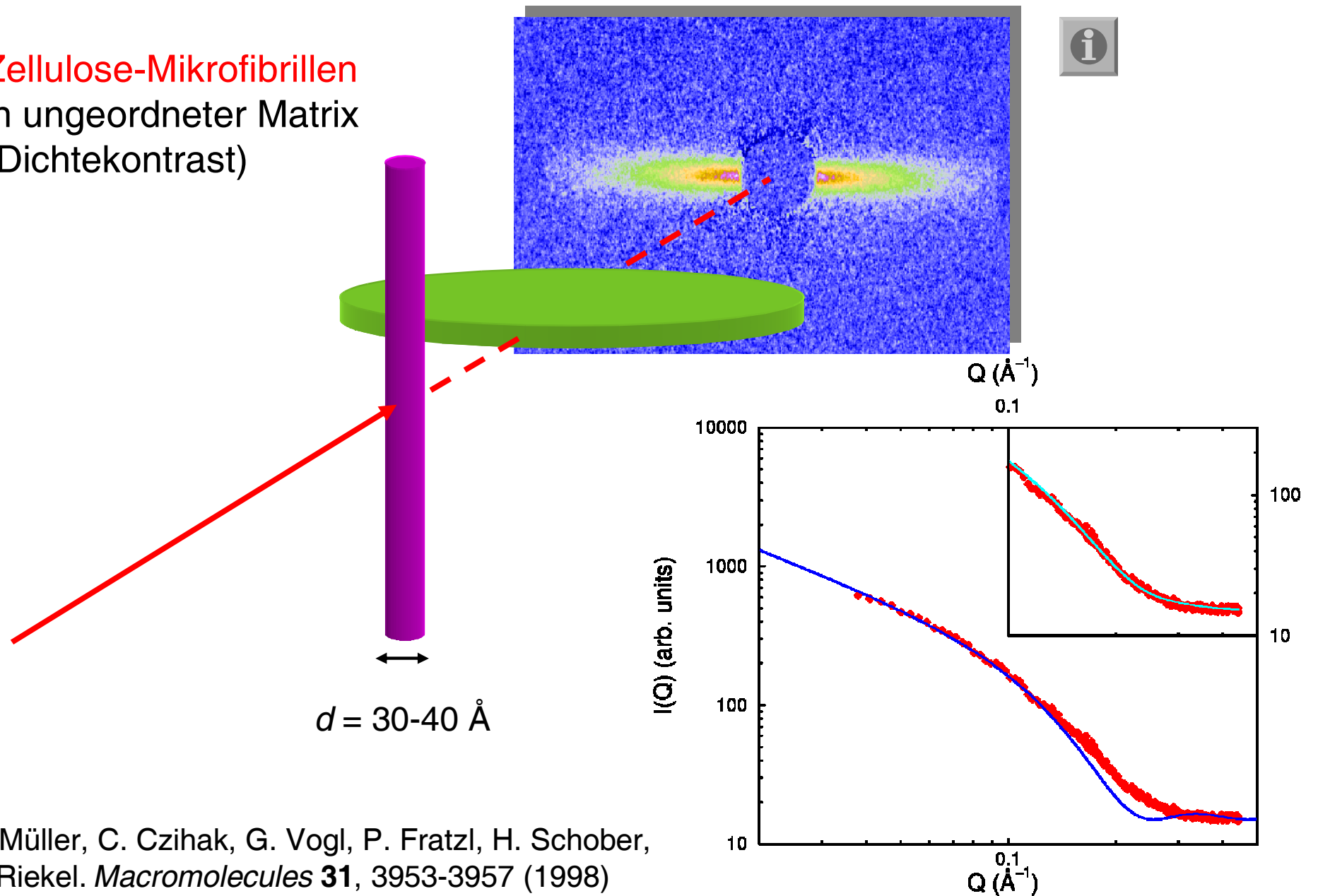
- *Formfaktor* = Fourier-Transformierte von (Einzel-)Teilchen
- *Strukturfaktor* = Interpartikel-Interferenz

Formfaktor (verdünnte Systeme)

Kugel:
$$I(Q) \propto \left| \frac{3(\sin QR - QR \cos QR)}{Q^3 R^3} \right|^2$$



Zellulose-Mikrofibrillen
in ungeordneter Matrix
(Dichtekontrast)

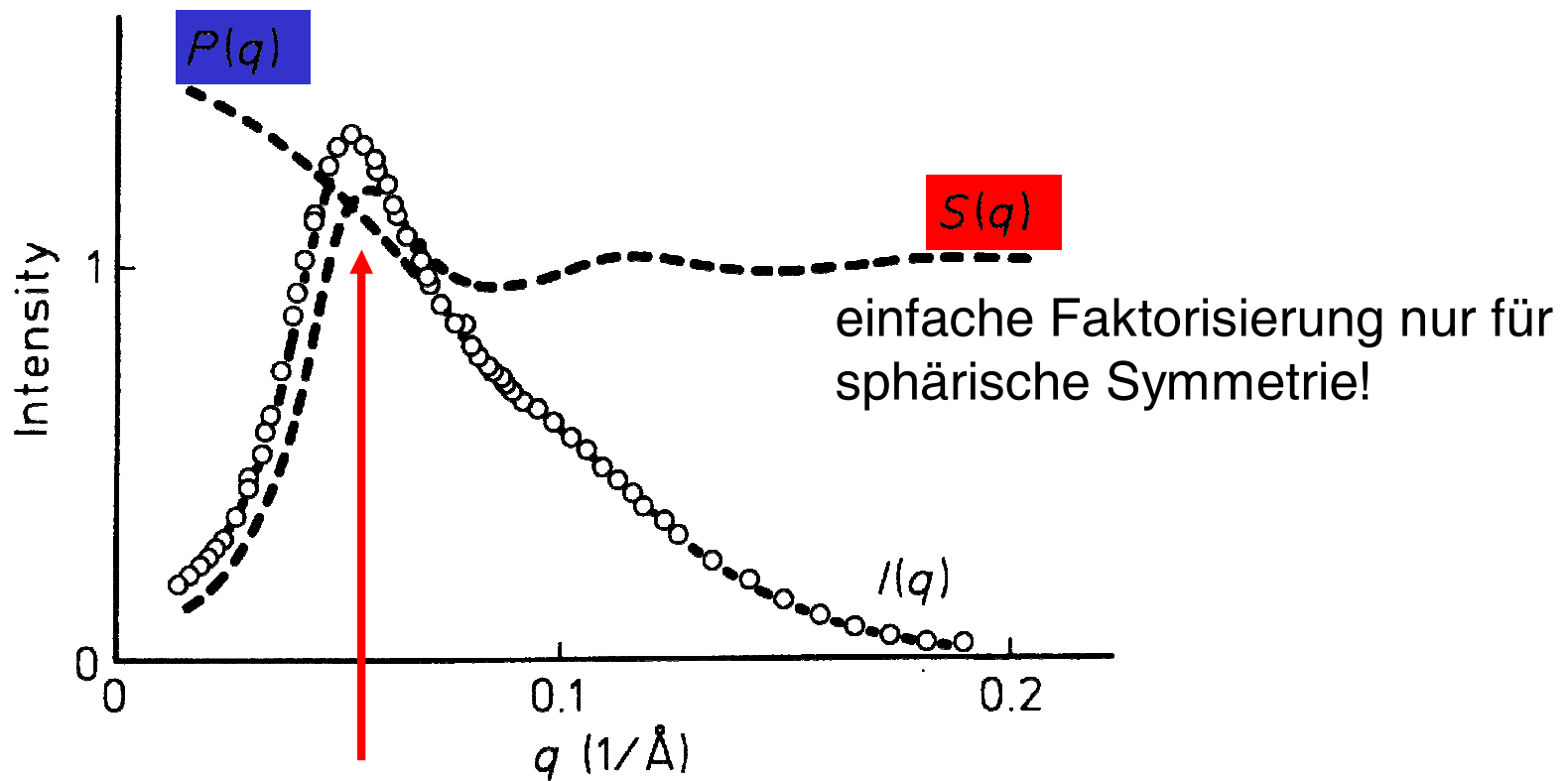


M. Müller, C. Czihak, G. Vogl, P. Fratzl, H. Schober, C. Riekell. *Macromolecules* **31**, 3953-3957 (1998)

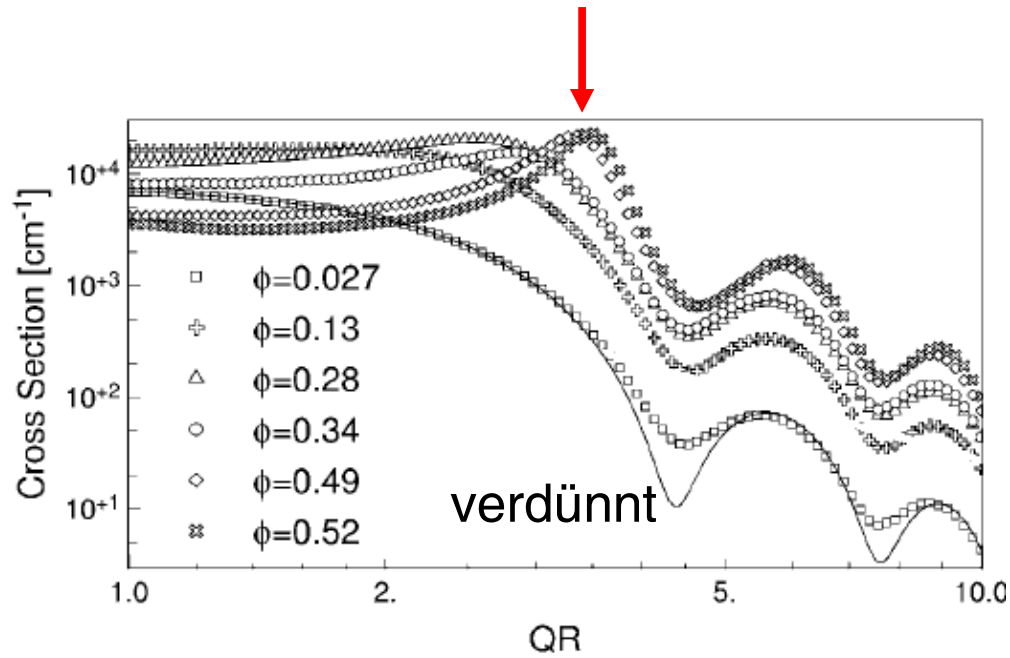
Formfaktor und Strukturfaktor (konzentrierte Systeme)

Prinzip wie bei Diffraktion:

- **Formfaktor** (wie eben): Einzelteilchen, **verdünnte** Systeme
- **Strukturfaktor**: Abstände zwischen Teilchen in Größenordnung der Teilchengröße \Rightarrow **Interferenz**

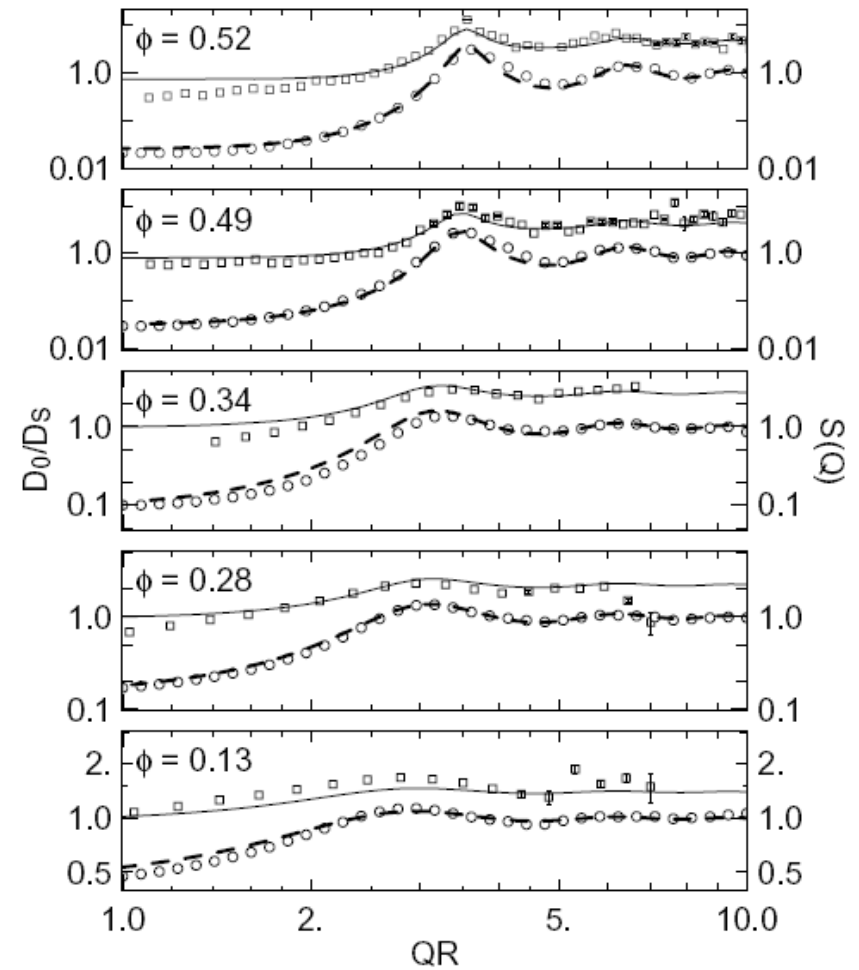


„Braggreflex“ von Langperiode ($d = 2\pi/q \approx 120 \text{ Å}$)



Streukurven

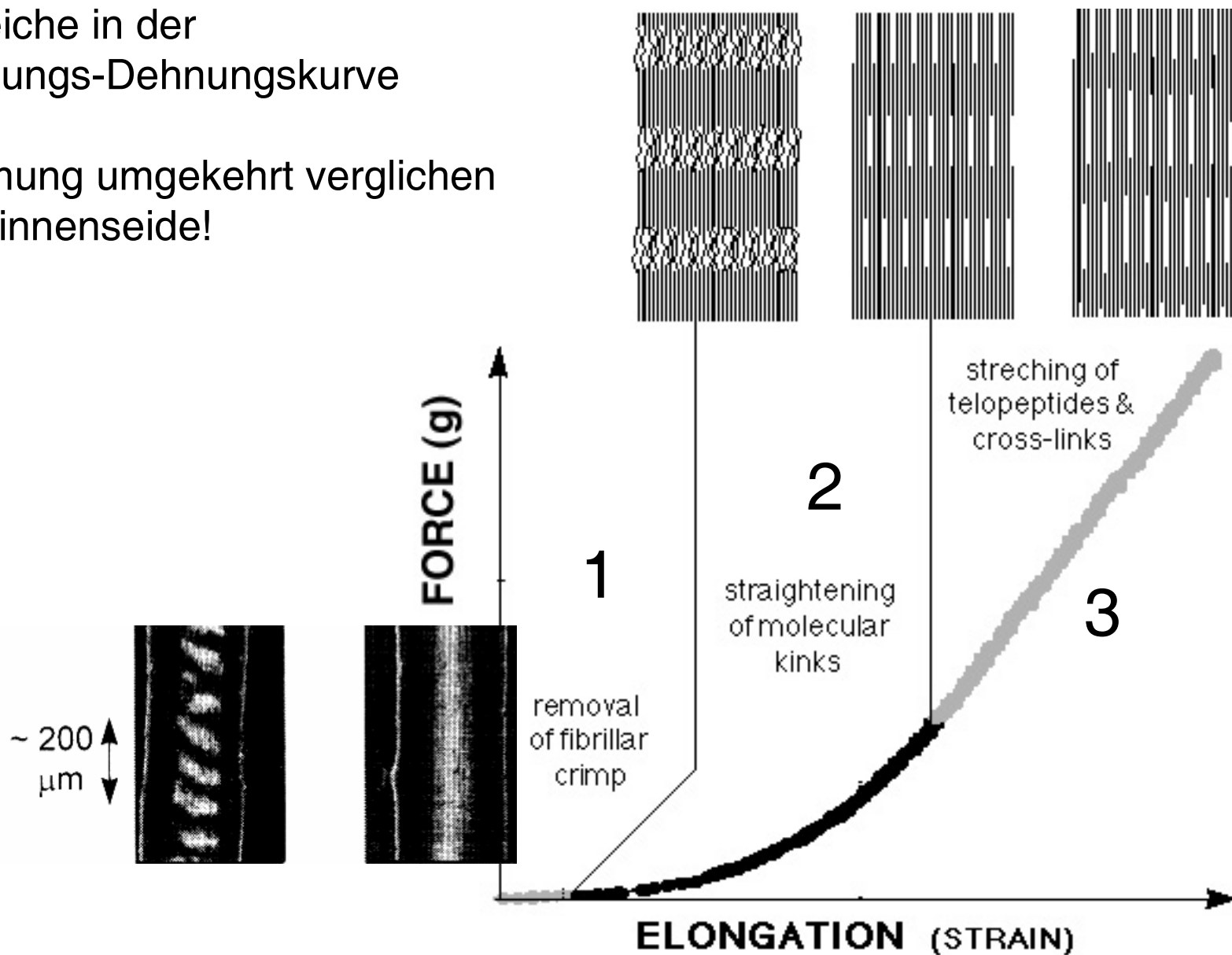
Strukturfaktoren



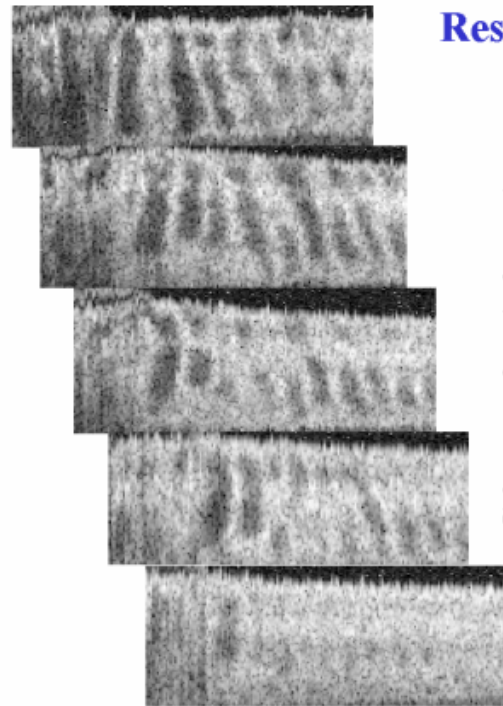
2.5.2 Mechanische Eigenschaften von Collagen

3 Bereiche in der
Spannungs-Dehnungskurve

Krümmung umgekehrt verglichen
mit Spinnenseide!

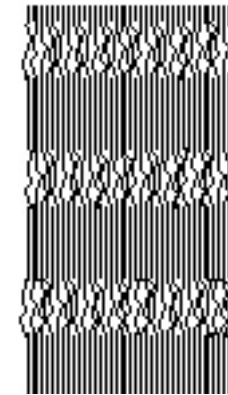
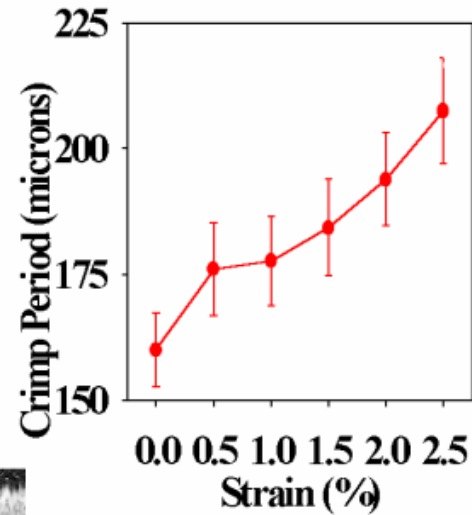


1. Geradeziehen der ganzen Faser

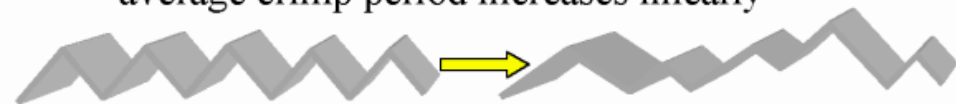


Lichtmikroskopie

Results



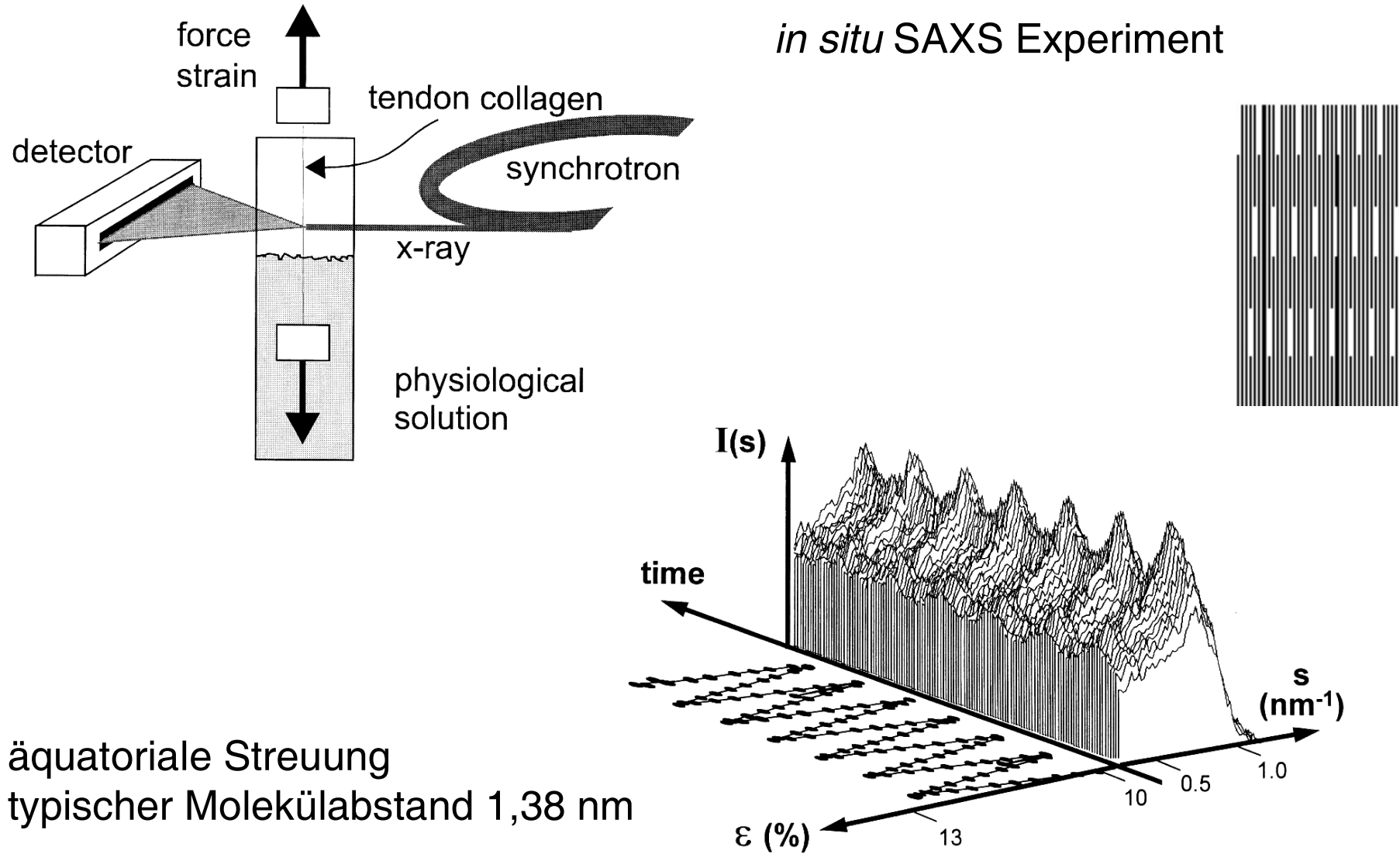
- Individual crimp periods do not change linearly, average crimp period increases linearly

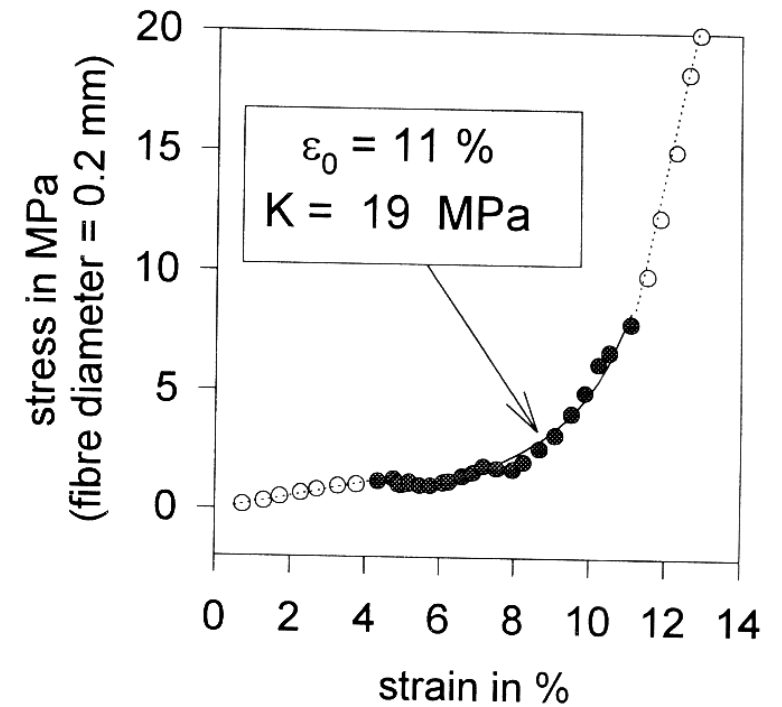
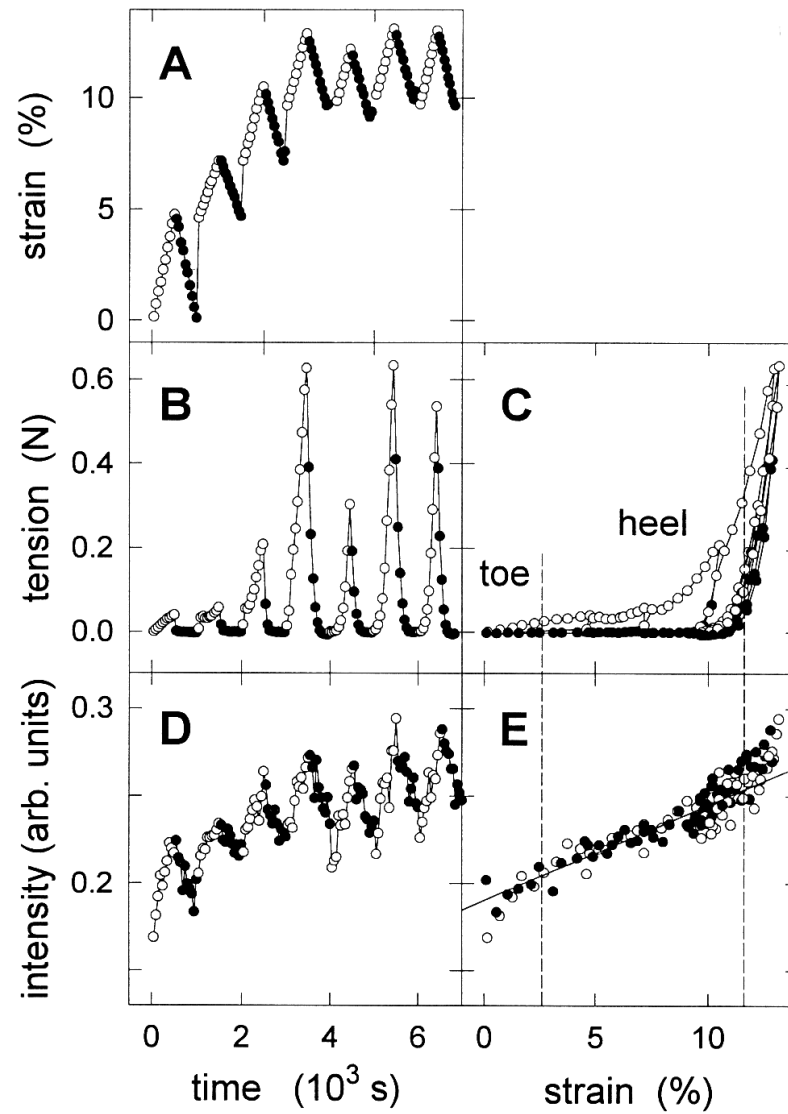


- Some crimp is extinguished and becomes part of another crimp period



2. Anstieg des E-Moduls; Glätten von "Kinks"

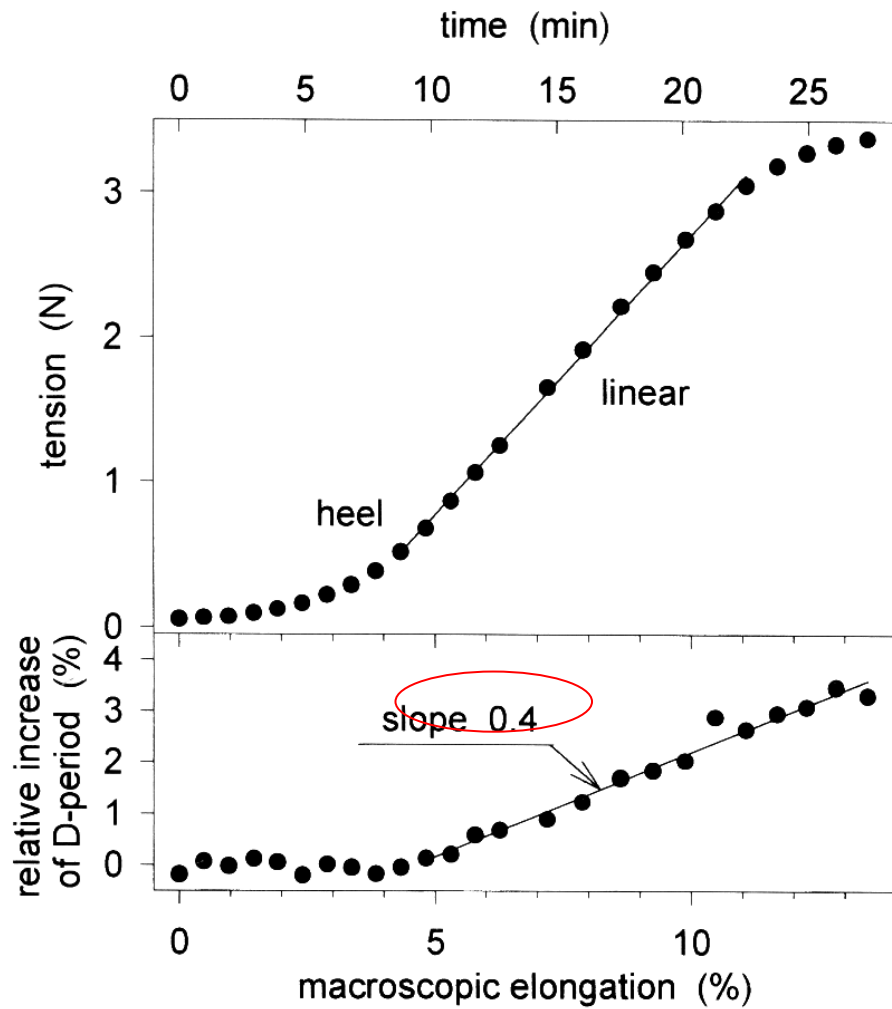




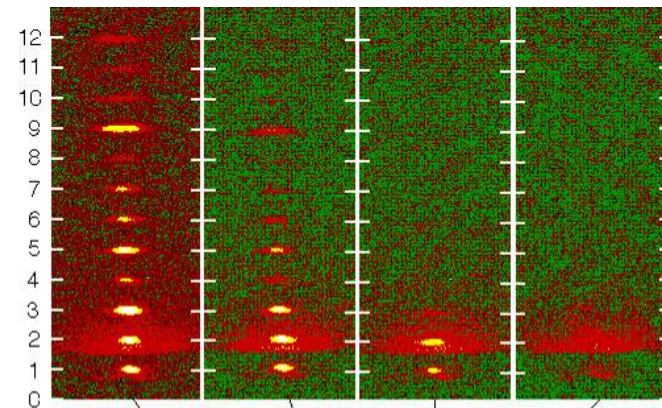
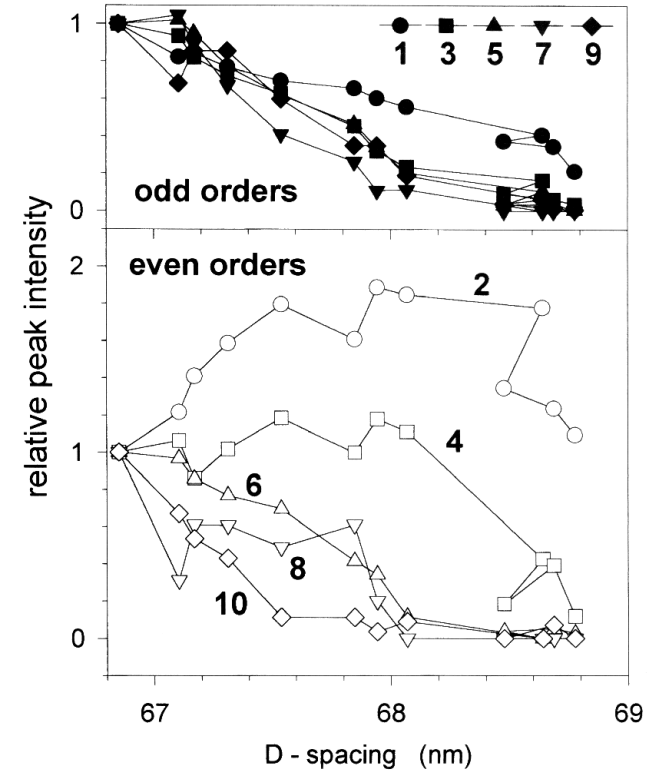
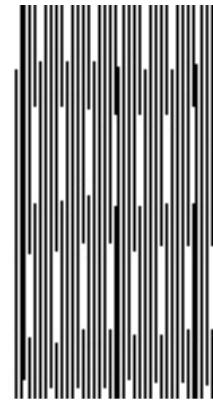
Modellfit für die
Übergangsregion

Ergebnisse zyklischer Belastung

3. Linearer Bereich; Moleküldehnung und Gleiten



Anstieg der 68 nm - Periode



2.6 Knochen

- Ausgangspunkt **Collagen** = auf **Zug**belastung optimiertes Protein
- **Mineralisierung**: Einlagerung harter anorganischer Kristalle \Rightarrow Komposit
- Sehne \Rightarrow mineralisierte Sehne \Rightarrow Knochen:
 - Anstieg des Elastizitätsmoduls
 - Erniedrigung der maximalen Dehnung ε_{\max}
(Dehnung 0,78 %, Kompression 0,84 %)
 - Erhöhung der maximalen Spannung σ_{\max}
- Knochen: auf **Zug-** und **Druck**belastung optimiert !

2.6.1 Hierarchische Strukturierung

Wiederholung: hierarchische Struktur von **Collagen**

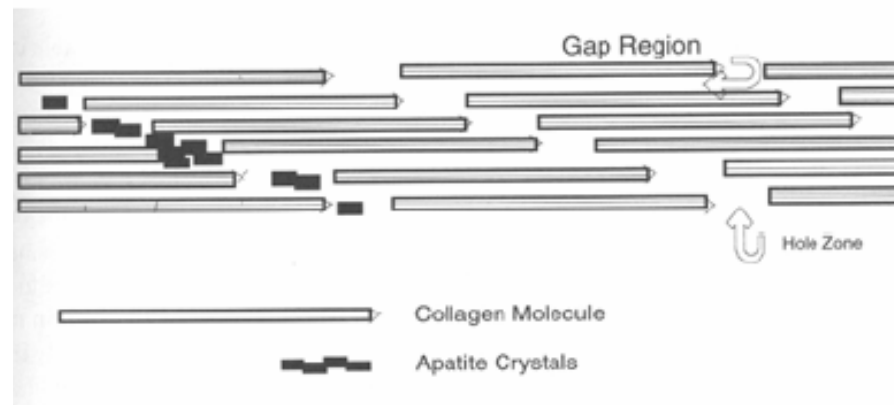


Mineralisierung: Einbau von *Hydroxyapatit* in Zwischenräume (Gaps):

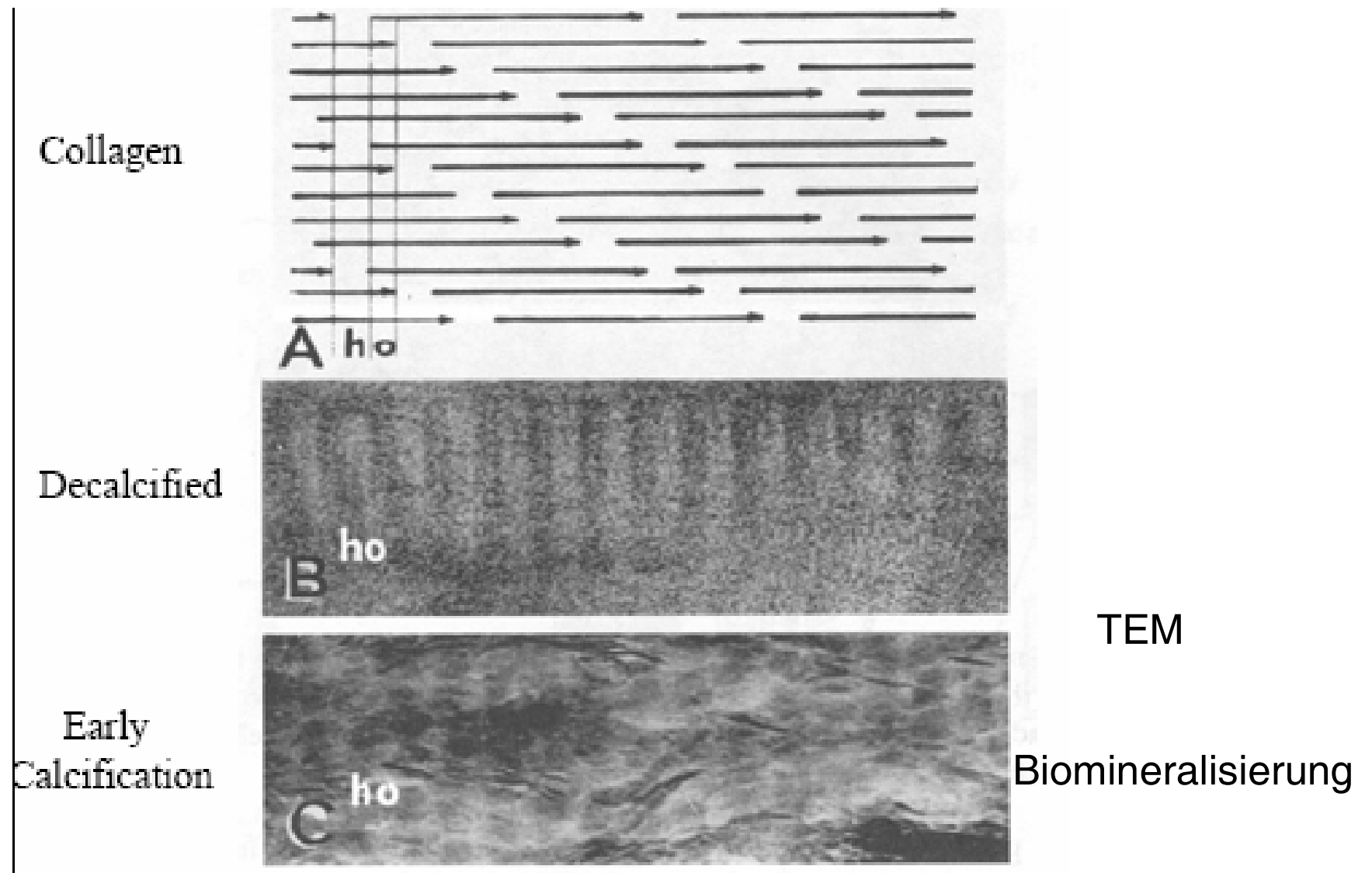
Dahlit $\text{Ca}_5(\text{PO}_4, \text{CO}_3)_3\text{OH}$, 3 nm Durchmesser, < 40 nm Länge

Bone mineralization

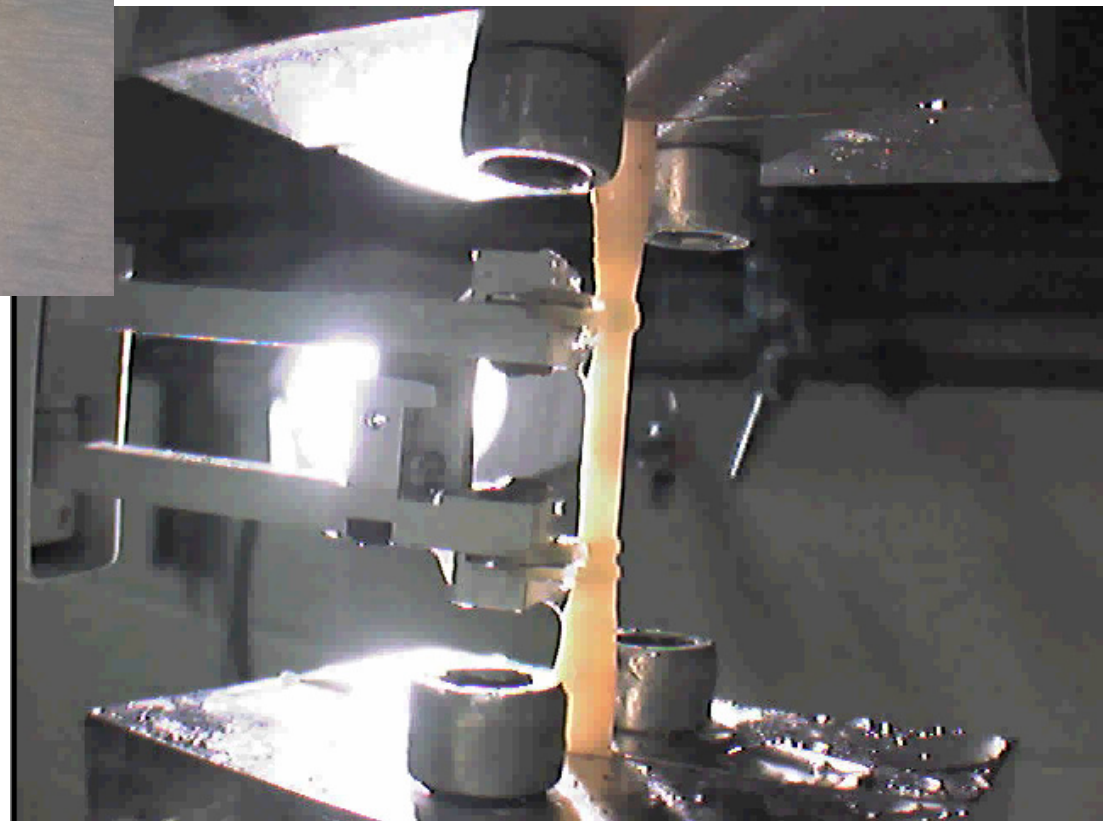
■ Collagen may act to aid nucleation



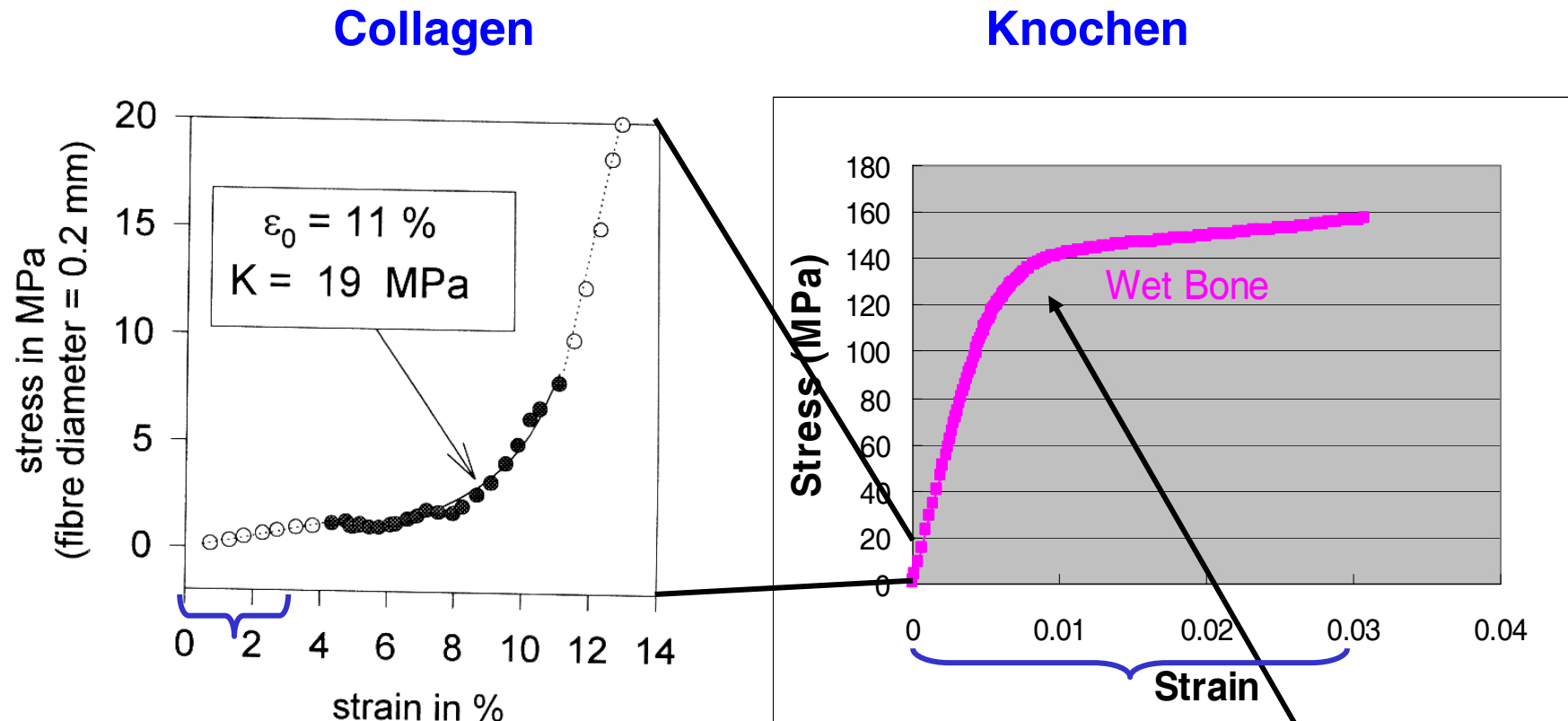
Packung der Mineralkristalle in Collagen-Fibrillen:



Messung der **mechanischen Eigenschaften** von Knochen



Veränderung der mechanischen Eigenschaften von Collagen durch Biomineralisation



- Anstieg des **Elastizitätsmoduls**
- Erniedrigung der **maximalen Dehnung** ϵ_{\max}
(größer in Kompression!)
- Erhöhung der **maximalen Spannung** σ_{\max}

• **Streckgrenze!**