

## Physikalische Grundlagen der zahnärztlichen Materialkunde

– 2 –

### Struktur der Materie. Aggregatzustände: Flüssigkeiten, feste Körper, Flüssigkristalle

erarbeitet von: Gergely AGÓCS, Ferenc TÖLGYESI  
17. September 2020.

Kapitel des  
Lehrbuches:  
4, 5

FAFA\_DE

2 | Flüssigkeiten, feste Körper, Flüssigkristalle

1

## Schwerpunkte

❖ Viskosität

❖ Wasser und Speichel

❖ Kristalle – Apatit

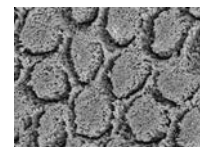
❖ Kristalldefekte und ihre Bedeutung (siehe auch:  
Damjanovich-Fidy-Szöllösi: Biophysik für Mediziner, I/3.3.5.)

❖ Amorphe Stoffe – Gläser

❖ Flüssigkristalle (Das Thema ist in dem FAFA-Lehrbuch nicht  
zu finden, statt dessen siehe: Damjanovich-Fidy-Szöllösi:  
Biophysik für Mediziner, I/3.4.2.)



eine niederviskose (l) und eine hochviskose (r) Flüssigkeit



Hydroxylapatit-Kristalle in Zahnschmelz-  
Stäbchen. Maßstab: — = 2 μm

FAFA\_DE

2 | Flüssigkeiten, feste Körper, Flüssigkristalle

2

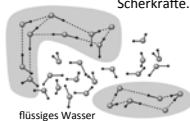
## Flüssigkeiten und feste Körper

flüssig



Keine Eigenform:

Nach Deformieren bleibt so, es  
gibt keine rückstellende  
Scherkräfte.



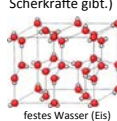
flüssiges Wasser

fest

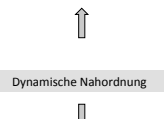


Eigenform:

Nach Deformieren stellt sich  
zurück, da es rückstellende  
Scherkräfte gibt.)



festes Wasser (Eis)



Dynamische Nahordnung



Isotropie

FAFA\_DE

2 | Flüssigkeiten, feste Körper, Flüssigkristalle

3

## Viskosität ( $\eta$ ) und Fluidität (Fließbarkeit, $1/\eta$ )

$F = ?$

$F = ?$

(siehe Hagen-Poiseuille-Gesetz  
später)

aufeinander gleitende  
hypothetische  
Flüssigkeitsschichten

Geschwindigkeitsgefälle,  
 $\frac{\Delta v}{\Delta h}$

bewegte Fläche, A

$F = F_R$

$F = ?$

$F_R$

Scherkräfte

Haften

Gleiten

fixierte Fläche

Geschwindigkeit der Flüssigkeitsschicht  
im Verhältnis zur stehenden Fläche

**Newtonsches Reibungsgesetz:**

$$F_R = \eta \cdot A \cdot \frac{\Delta v}{\Delta h}$$

Viskosität (innerer  
Reibungskoeffizient)  
 $[\eta] = \text{Pa} \cdot \text{s}$

Eine andere Form des newtonschen  
Reibungsgesetzes:

$$\frac{F_R}{A} = \eta \cdot \frac{\Delta v}{\Delta h}$$

$\sigma_{\text{Scher}}$

Scherspannung

$\sigma_{\text{Scher}} = \eta g_v$

Geschwindigkeitsgefälle  
(auch: Schergeschwindigkeit,  
Schergefälle, Scherrate)

$g_v$

FAFA\_DE

2 | Flüssigkeiten, feste Körper, Flüssigkristalle

4

## Viskosimetrie

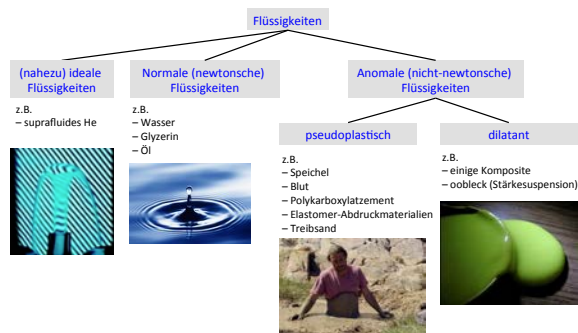


FAFA\_DE

2 | Flüssigkeiten, feste Körper, Flüssigkristalle

5

## Aufteilung von Flüssigkeiten nach ihrer Viskosität

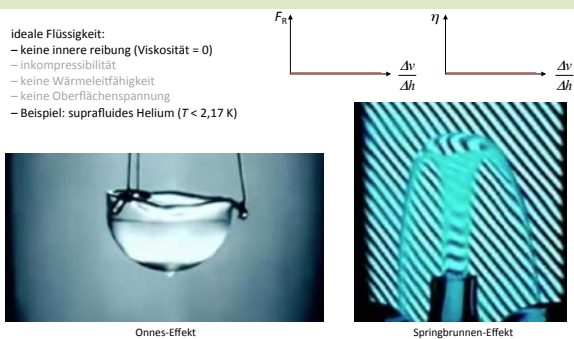


FAFA\_DE

2 | Flüssigkeiten, feste Körper, Flüssigkristalle

6

## Ideale Flüssigkeiten

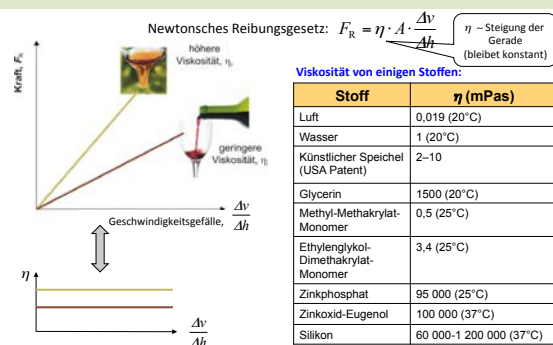


FAFA\_DE

2 | Flüssigkeiten, feste Körper, Flüssigkristalle

7

## Newtonsche Flüssigkeiten I.



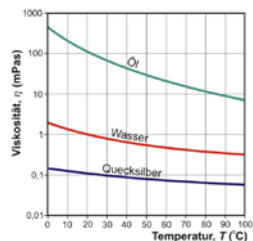
FAFA\_DE

2 | Flüssigkeiten, feste Körper, Flüssigkristalle

8

## Newtonsche Flüssigkeiten II.

- $\eta$  hängt ab:
- vom Stoff
  - von der Temperatur



(Die Viskosität der Gase nimmt mit wachsender Temperatur zu. Warum?)



FAFA\_DE

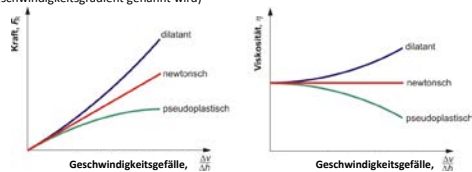
2 | Flüssigkeiten, feste Körper, Flüssigkristalle

9

## Nicht-newtonsche Flüssigkeiten

$\eta$  hängt ab:

- von den Scherkräften (oder vom Geschwindigkeitsgefälle, das manchmal auch Geschwindigkeitsgradient genannt wird)



Bingham-Flüssigkeiten:



FAFA\_DE

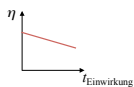
2 | Flüssigkeiten, feste Körper, Flüssigkristalle

10

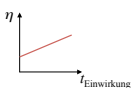
## Zeitabhängige Viskosität

- $\eta$  hängt ab:
- von der Zeit der mechanischen Einwirkung (wenn lang genug in Ruhe gelassen, wird die ursprüngliche Viskosität wiederhergestellt)

Thixotrope Flüssigkeiten:



Rheopexie Flüssigkeiten:



Bitte nicht verwechseln mit pseudoplastischen und dilatanten Flüssigkeiten!

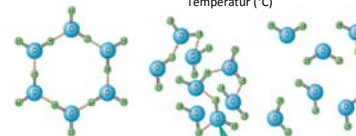
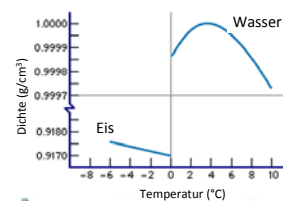
FAFA\_DE

2 | Flüssigkeiten, feste Körper, Flüssigkristalle

11

## Wasser I.

- flüssig in einem breiten Temperaturbereich
- relativ kleine Dichte ( $1 \text{ g/cm}^3$ )
- newtonsche Flüssigkeit, relativ kleine Viskosität



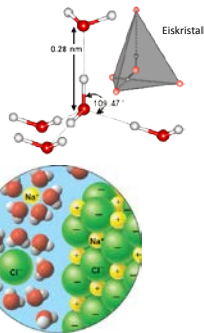
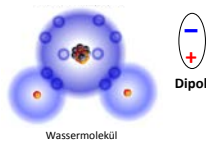
FAFA\_DE

2 | Flüssigkeiten, feste Körper, Flüssigkristalle

12

## Wasser II.

- hohe spezifische Wärmekapazität, Schmelzwärme und Verdampfungswärme
- hohe Oberflächenspannung
- gutes Lösungsmittel

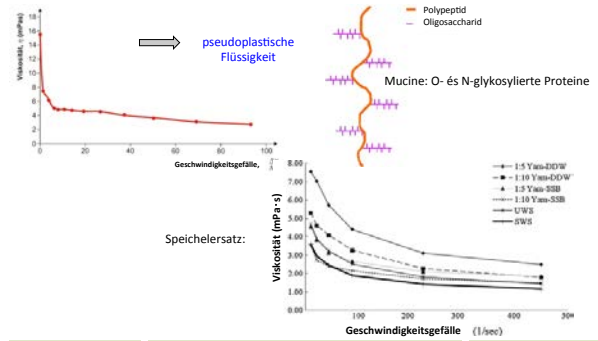


FAFA\_DE

2 | Flüssigkeiten, feste Körper, Flüssigkristalle

13

## Speichel

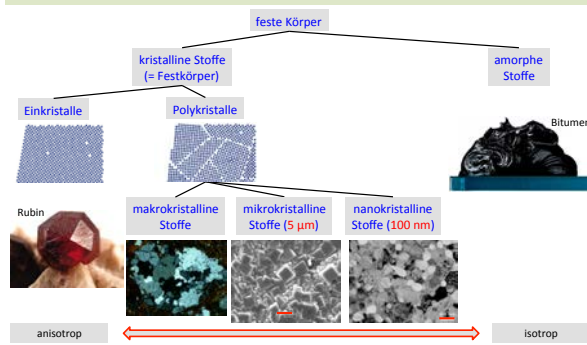


FAFA\_DE

2 | Flüssigkeiten, feste Körper, Flüssigkristalle

14

## Feste Körper und Festkörper



FAFA\_DE

2 | Flüssigkeiten, feste Körper, Flüssigkristalle

15

## Natürliche Einkristalle



FAFA\_DE

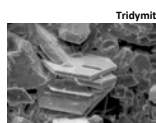
2 | Flüssigkeiten, feste Körper, Flüssigkristalle

16

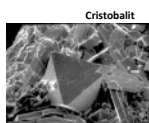
## Polymorphie

Polymorphie: gleicher Aggregatzustand, unterschiedliche Strukturformen

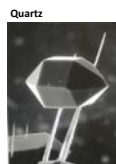
SiO<sub>2</sub>



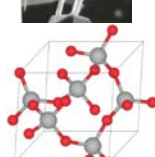
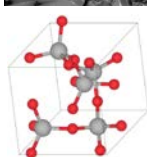
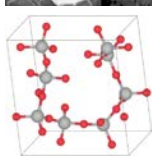
Tridymit



Cristobalit



Quartz



FAFA\_DE

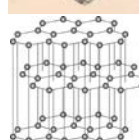
2 | Flüssigkeiten, feste Körper, Flüssigkristalle

17

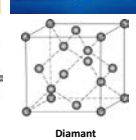
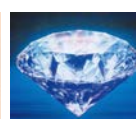
## Allotropie

Allotropie: Polymorphie von Elementen

Kohlenstoff (C)



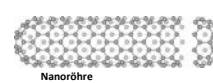
Graphit



Diamant



Fulleren



Nanoröhre

Zinn (Sn) und Zinnpest



grauschwarzes  
α-Zinn  
(kubisch)

silberweißes  
β-Zinn  
(oktaedrisch)

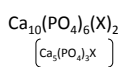
13,2 °C

FAFA\_DE

2 | Flüssigkeiten, feste Körper, Flüssigkristalle

18

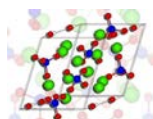
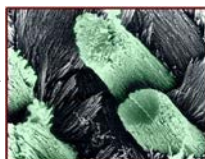
## Apatit



OH : Hydroxiapatit  
F : Fluorapatit

– Warum können die Hydroxidionen im Apatitkristall durch Fluoridionen ersetzt werden?  
– Was ist die zahnärztliche Bedeutung?

hexagonaler Ionenkristall



Dentin, Knochen: 20-60 nm x 6 nm große Kristalle  
Zahnschmelz: 500-1000 nm x 30 nm große Kristalle

FAFA\_DE

2 | Flüssigkeiten, feste Körper, Flüssigkristalle

19

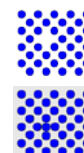
## Gitterdefekte I.

### Punktdefekte

#### thermisch

Vakanz/Leerstelle  
(Schottky-Defekt)

Interstitielles Atom  
(Zwischengitteratom)



$$n_s = N \cdot e^{-\frac{\epsilon_s}{kT}}$$

Frenkel-Defekt  
(Frenkel-Paar)

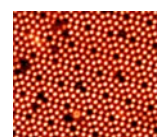
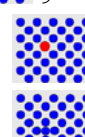
Zahl der Schottky-Defekte

#### Fremdatom

An einer Gitterstelle  
(Substitutionsatom)

An einer Zwischengitterstelle  
(interstitielles Atom)

s. Legierungen!



FAFA\_DE

2 | Flüssigkeiten, feste Körper, Flüssigkristalle

20

## Gitterdefekte II.

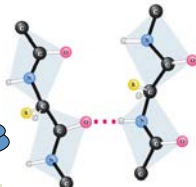
Entstehung und Bewegung von Punktdefekten:

Thermische Fehler in biologischen Makromolekülen:



$$n_S = N \cdot e^{-\frac{\epsilon_S}{kT}}$$

Zahl der aufgespaltenen H-Brücken



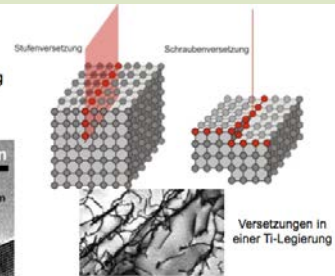
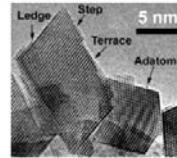
FAFA\_DE

2 | Flüssigkeiten, feste Körper, Flüssigkristalle

21

## Gitterdefekte III.

- Versetzungen
  - Stufenversetzung
  - Schraubenversetzung
- Korngrenzen



FAFA\_DE

2 | Flüssigkeiten, feste Körper, Flüssigkristalle

22

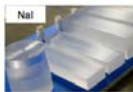
## Gitterdefekte IV.

Gitterdefekte  $\Rightarrow$  Eigenschaften!!

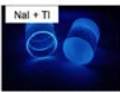
z. B. optische Eigenschaften

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

„The better of regularity the crystal has, the more perfect its properties will be.“

+ Cr<sup>3+</sup>+ V<sup>3+</sup>Fe<sup>3+</sup>+ Ti<sup>4+</sup> + Fe<sup>3+</sup>Rubin  $\Rightarrow$  siehe Rubinlaser

NaI



NaI + Ti

siehe Szintillationskristall in der Nuklearmedizin  
Praktikum Nukleare Grundmessung  
(unter Röntgenbestrahlung)

FAFA\_DE

2 | Flüssigkeiten, feste Körper, Flüssigkristalle

23

## Gitterdefekte V.

z. B. mechanische Eigenschaften



z. B. chemische Eigenschaften

Ca<sub>10</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>(OH)<sub>2</sub>

Hydroxiapatit

Ca<sub>10</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>F<sub>2</sub>

Fluorapatit

Kleinere Löslichkeit in Säuren

– Was ist die chemische Erklärung?

z. B. elektrische Eigenschaften

siehe reine und dotierte Halbleiter

FAFA\_DE

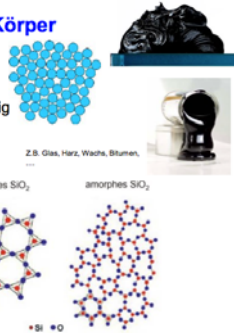
2 | Flüssigkeiten, feste Körper, Flüssigkristalle

24

## Amorphe Körper

### Amorphe (feste) Körper

- Eigenvolumen
- Mechanisch hart
- Keine Eigenform/flüssig  
sehr hohe Viskosität;  
„gefrorene Flüssigkeit“
- Nahordnung
- Viele Defekte
- Isotrop



FAFA\_DE

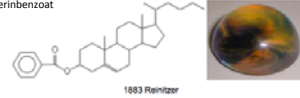
2 | Flüssigkeiten, feste Körper, Flüssigkristalle

25

## Flüssigkristalle I.

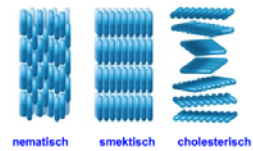
Das Thema ist in dem FAFA-Lehrbuch nicht zu finden,  
statt dessen siehe: Damjanovich-Fidy-Szöllösi: Biophysik für Mediziner, I/3.4.2.)

Cholesterinbenzoat



- Anisodimensionale Moleküle
- Mesophase
- Flüssig
- Teilweise geordnete Strukturen
- Optisch anisotrop
- Gegen äußere Einwirkungen empfindliche Struktur

### Strukturen der termotropen Flüssigkristalle:



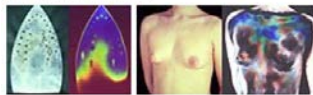
FAFA\_DE

2 | Flüssigkeiten, feste Körper, Flüssigkristalle

26

## Flüssigkristalle II.

### Kontaktthermographie/Plattenthermographie (thermo-optisches Phänomen)



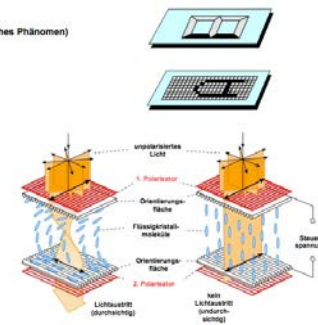
FAFA\_DE

2 | Flüssigkeiten, feste Körper, Flüssigkristalle

27

## Flüssigkristalle III.

### LCD (elektro-optisches Phänomen)



FAFA\_DE

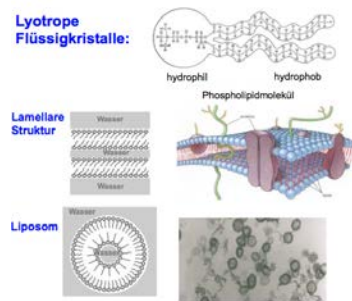
2 | Flüssigkeiten, feste Körper, Flüssigkristalle

28



## Flüssigkristalle IV.

### Lyotrope Flüssigkristalle:



Nächste Vorlesung:  
Kapitel 6 und 7

FAFA\_DE

2 | Flüssigkeiten, feste Körper, Flüssigkristalle

29

## Boltzmann-Verteilung: andere Anwendungen

### Anwendungen der Boltzmann-Verteilung:

- Barometrische Höhenformel
- Thermische Elektronenemission von Metallen
- Konzentrationselemente, Nernst-Gleichung
- Chemische Reaktionen (Geschwindigkeits- und Gleichgewichtskonstante)
- Konzentration von thermischen Punktdefekten (in Kristallen und Makromolekülen)
- Elektrische Leitfähigkeit von Halbleitern
- ...

### Aufgaben:

1. Abschnitt:  
22, 23, 32, 34, 35

FAFA\_DE

1 | Atomare Wechselwirkungen; Gase

30