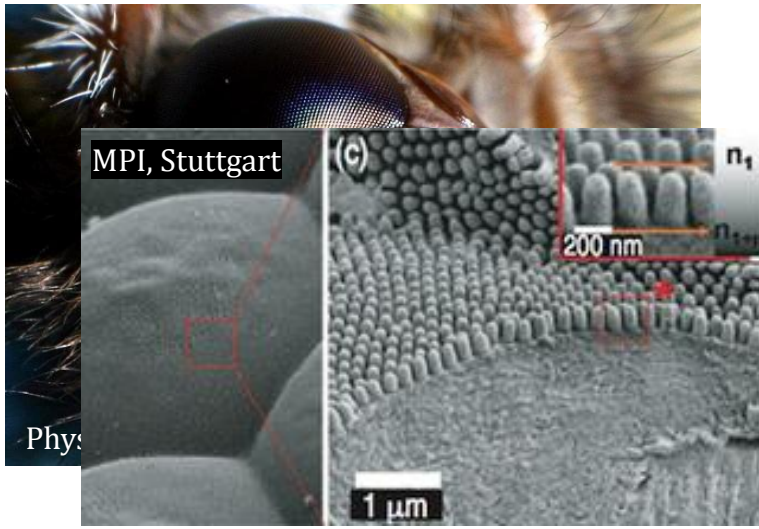
Funktionelle Mikrostrukturen in Natur und Technik

Teil 2: Mikrostrukturierte Haftoberflächen

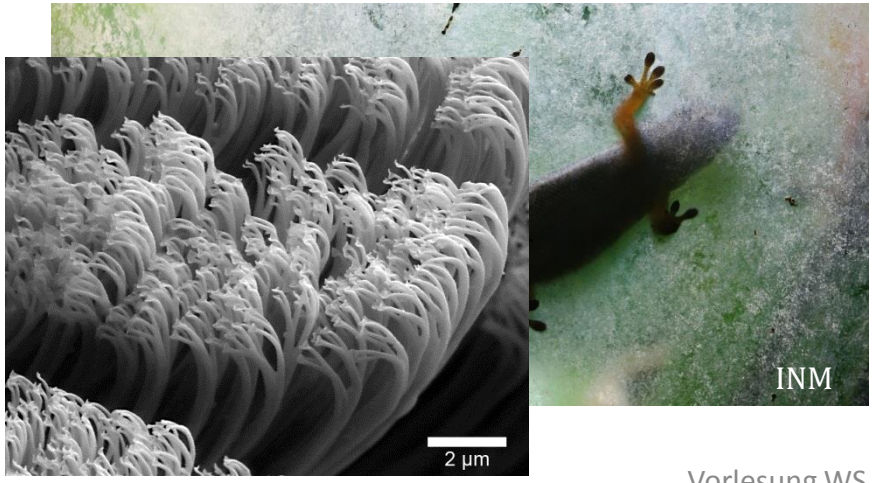
NanoBioMaterialien, Wintersemester 2018/19

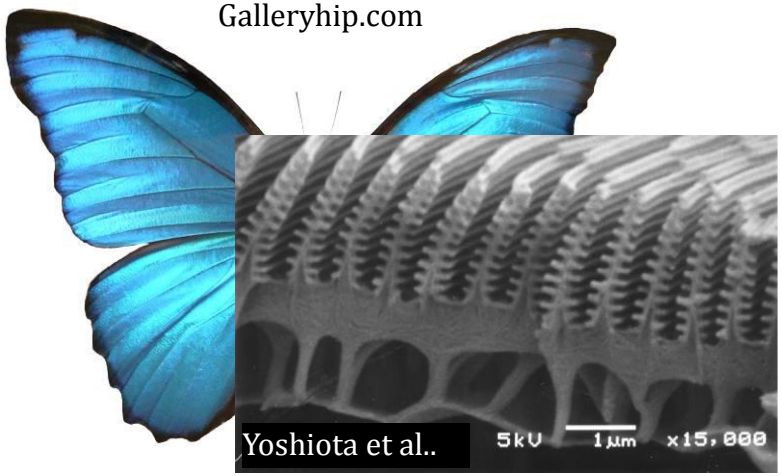
René Hensel, Eduard Arzt

Funktionale Oberflächen in der Natur



Galleryhip.com





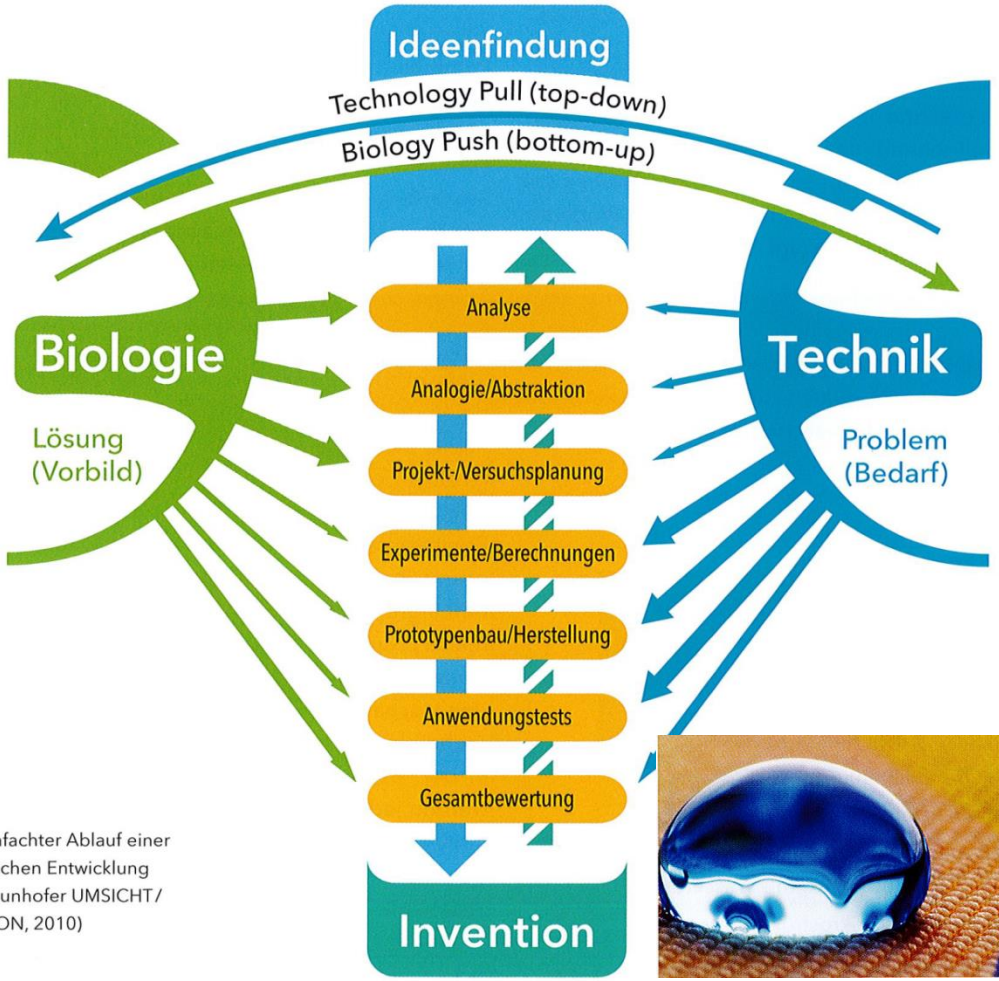
Bionik/*biomimetics*

„Bionik verbindet in interdisziplinärer Zusammenarbeit Biologie und Technik mit dem Ziel durch Abstraktion, Übertragung und Anwendung von Erkenntnissen, die an biologischen Vorbildern gewonnen werden, technische Fragestellungen zu lösen.“

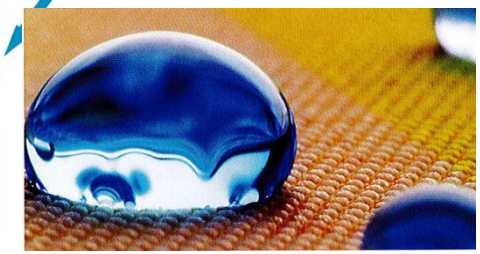
VDI Richtlinie 6223

Phänomen → Verständnis → Abstraktion → Übertragung

Bionik/*biomimetics*



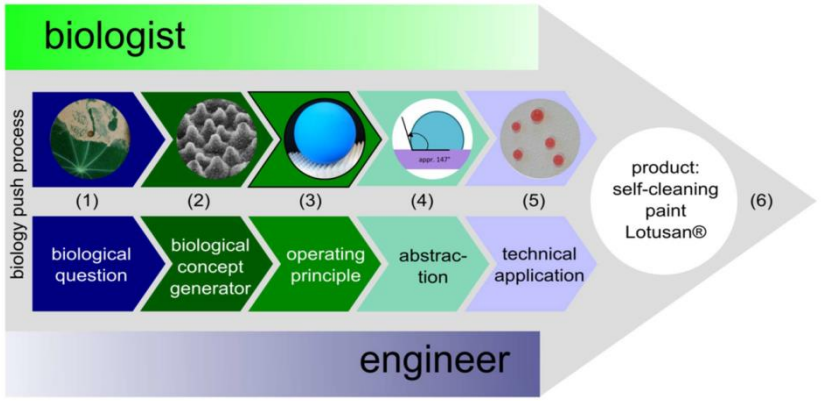
Vereinfachter Ablauf einer bionischen Entwicklung (© Fraunhofer UMSICHT / BIOKON, 2010)



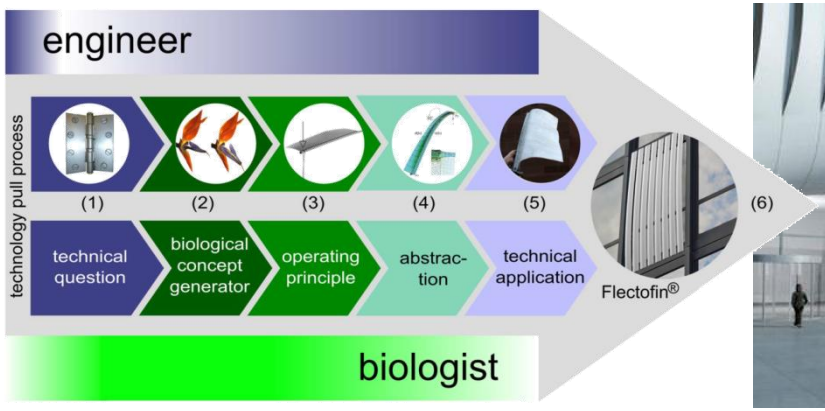
Reinhalten von Oberflächen

Bionik/*biomimetics*

Bottom-up:



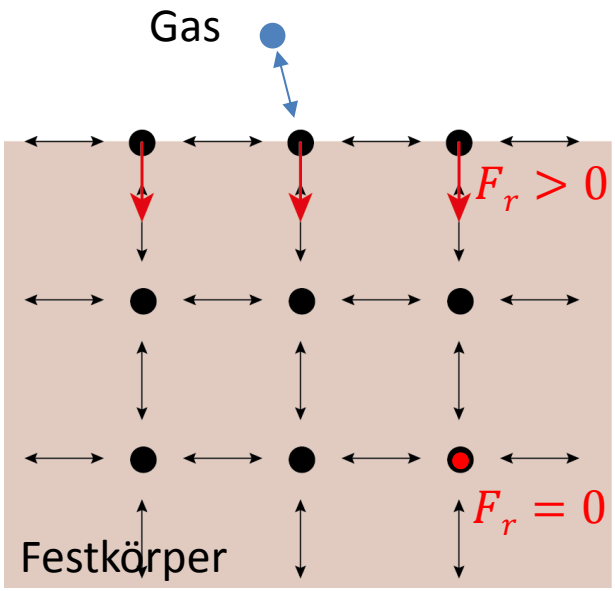
Top-down:



Speck et al., Bioinspir. Biomim., 2017

Oberflächenenergie

Interatomare oder –molekulare Wechselwirkungen



Bestimmung der OF-Energie:

- Kontaktwinkelmessung

$$\gamma = \frac{dW}{dA}$$ Einheit: [J/m²]

Oberflächenenergien und -spannungen

Übersicht

Material	γ (10^{-2} J/m^2)
Nylon	4.64
Polyvinylchlorid	3.9
Polystyrene	3.30
Polyethylen	3.0
Paraffin	2.50
PTFE (Teflon)	1.83
NaCl	16
Al_20_3	64
Si	128
Al	112
Ag	144
Fe	240
W	450

Flüssigkeit	γ (10^{-2} N/m)
Wasser	7.31
Benzin	2.88
n-Pentan	1.60
n-Octan	2.16
n-Dodecan $(C_{12}H_{26})$	2.54
n-Hexadecan $(C_{16}H_{34})$	2.76
n-Octadecan $C_{18}H_{38}$	2.80

Popov, V.L.

Oberflächen-Volumen Verhältnis

Größenverhältnis

Erddurchmesser = 1

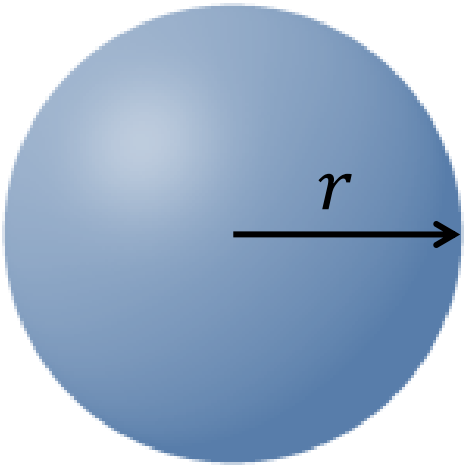
Mikro = 10^{-6}

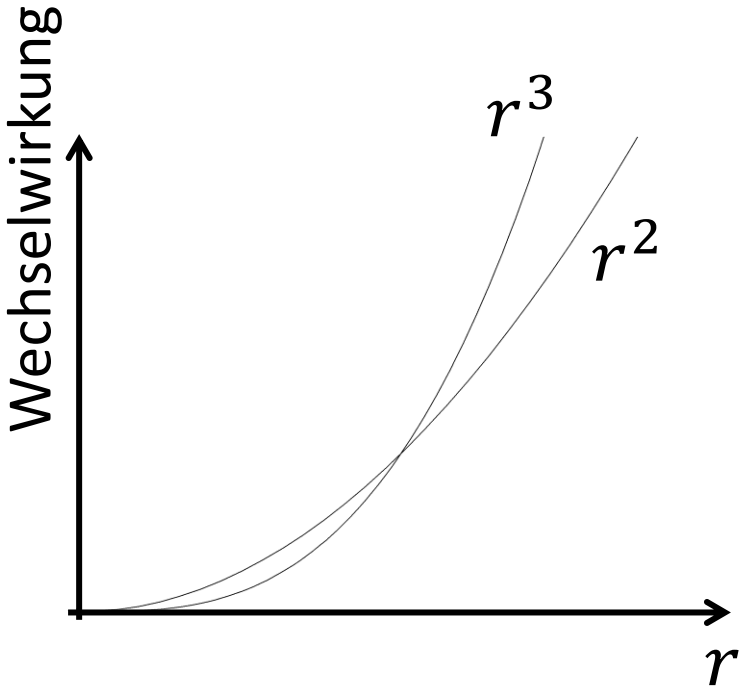
Nano = 10^{-9}

Oberflächen-Volumen Verhältnis

Kugel:

$A_0 \sim r^2$ $V \sim r^3$

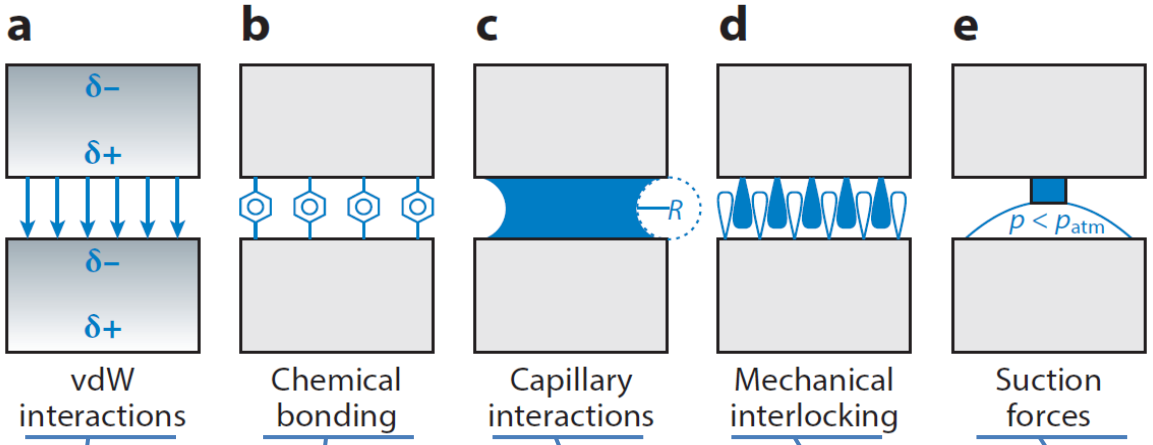




Auf kleinen Skalen dominieren OF-Effekte:
Bsp.: Benetzung & Adhäsion

Mikrostrukturierte Haftsysteme

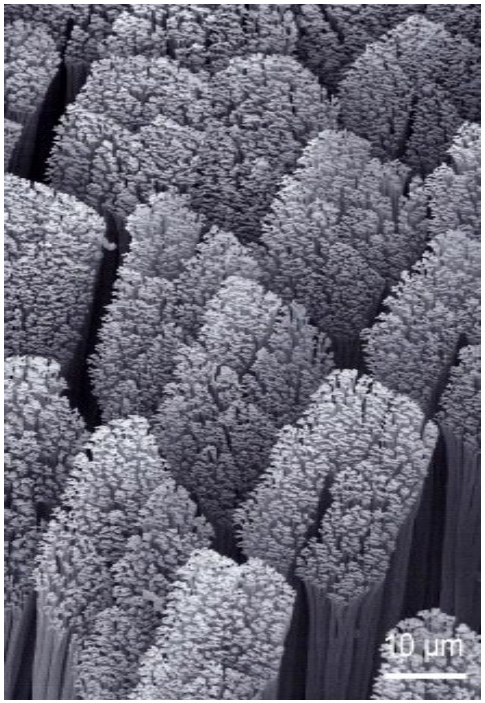
Haftsysteme in der Natur

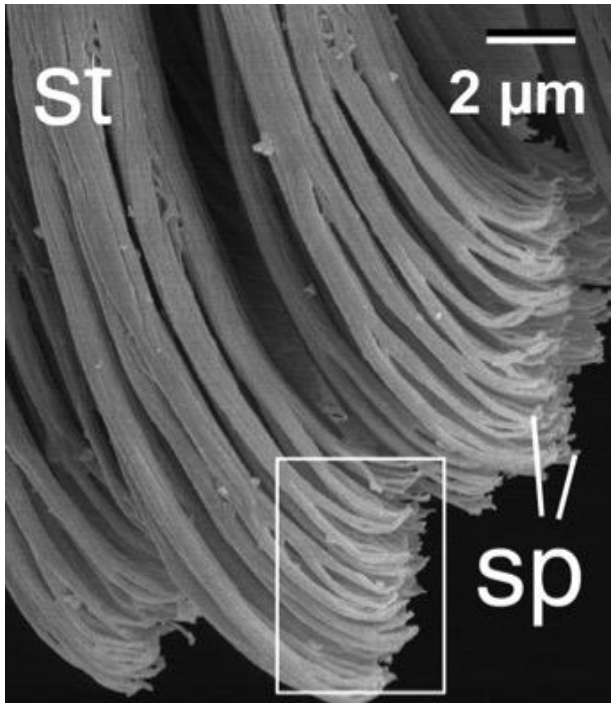


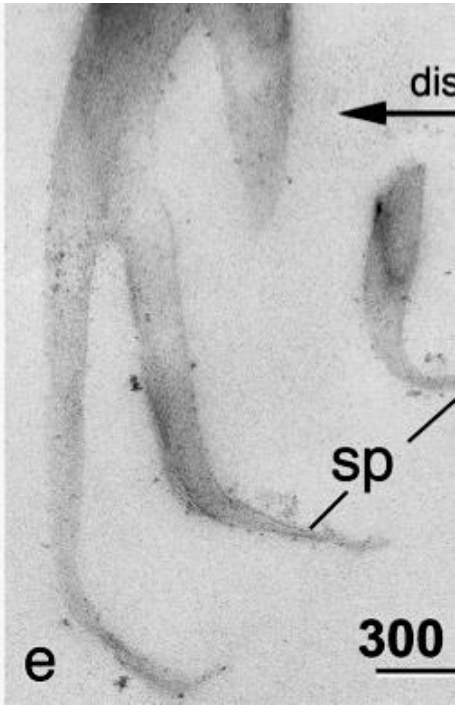
Heepe & Gorb,
Ann. Rev. Mat. Res., 2014

Gecko-Adhäsion

S. Gorb





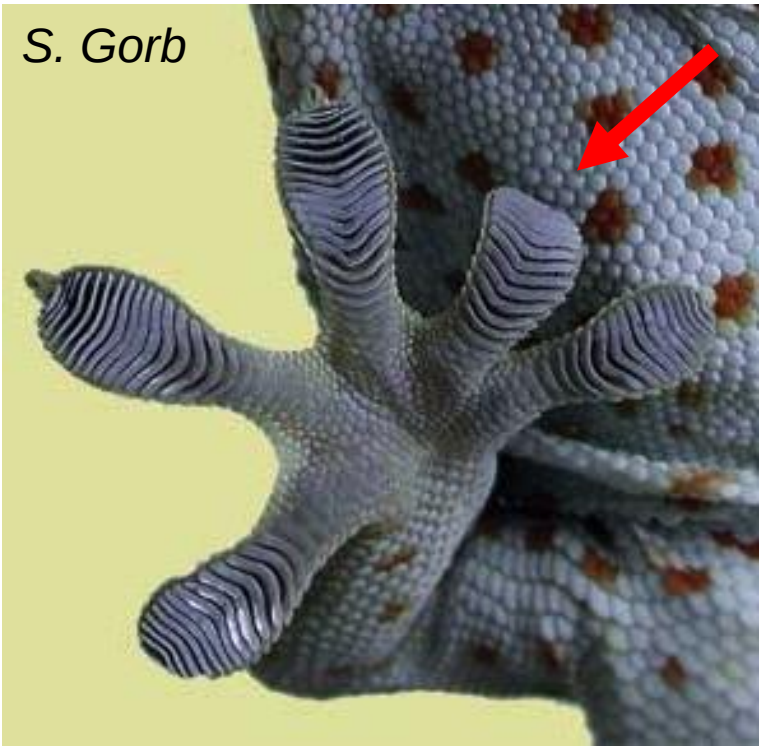


Gecko-Adhäsion

Ist eine Kombination aus…

…Mikrostruktur und Biomechanik

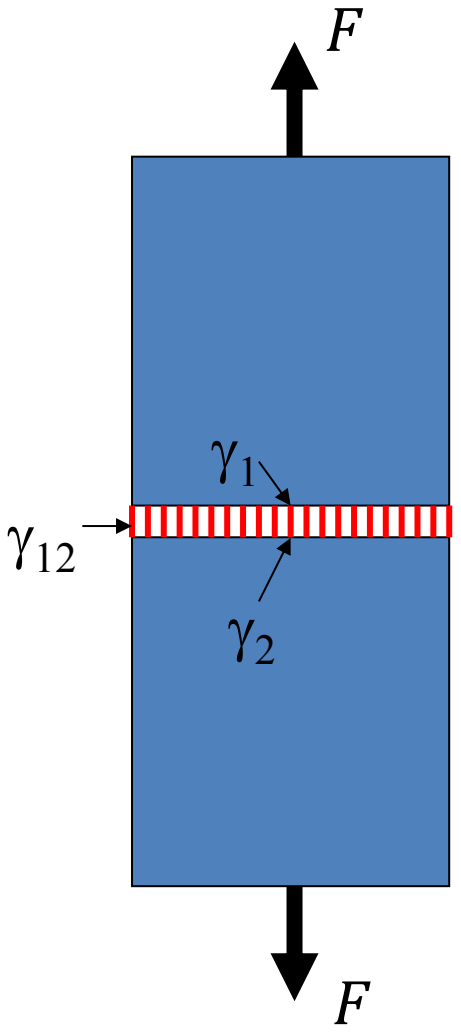
- Materialunabhängig
- Reversibel
- Rückstandsfrei
- Hohe Haftkraft bei geringen Anpresskraft



Van der Waals - Kraft

Annahme:

- Gleichmäßiger Kontakt
- Keine Kanteneffekte
- Alle Bindungen sind aktiv
- Alle Bindungen brechen gleichzeitig; kein Riß!



Adhäsionsarbeit (pro Einheitsfläche):

$$W_{ad} = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \qquad \gamma_{12} \approx 2\sqrt{\gamma_1 \gamma_2}$$

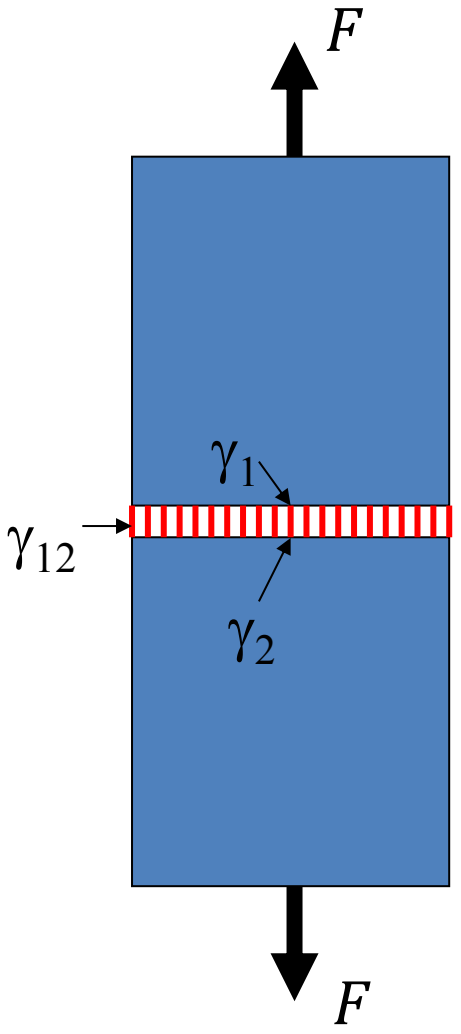
Van der Waals - Kraft

Abschätzung der VdW-Kraft, F_C:

$$\sigma_{VdW} = \frac{W_{ad}}{r_{max}} \approx \frac{10^{-2}\ \mathrm{J/m^2}}{10^{-10}\ \mathrm{m}} = 100\ \mathrm{MPa}$$

Für $A = 1\ \mathrm{cm^2}$ ergibt sich $F_C = 10^4\ \mathrm{N}$

VdW-Wechselwirkung ist kurzreichweitig, können aber über kurze Distanzen sehr stark sein.



Kontaktmechanik

1. Modell von Heinrich Hertz (1857-1894)

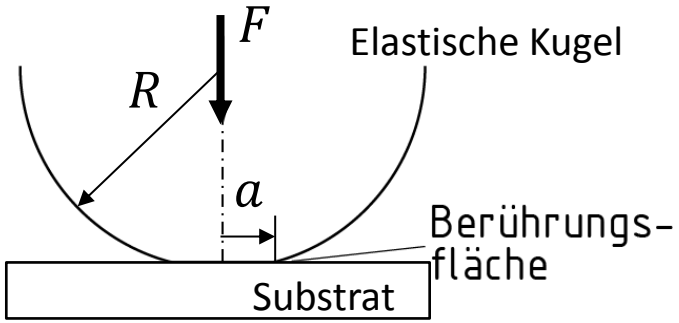
Anpresskraft = elastischer Rückstellkraft

Ueber die Berührung fester elastischer Körper.

(Von Herrn *Heinrich Hertz*.)

In der Theorie der Elasticität werden als Ursachen der Deformationen theils Kräfte, welche auf das Innere der Körper wirken, theils auf die Oberfläche wirkende Druckkräfte angenommen. Für beide Arten von Kräften kann der Fall eintreten, dass dieselben in einzelnen unendlich kleinen Theilen der Körper unendlich gross werden, so zwar, dass die Integrale der Kräfte über diese Theile genommen einen endlichen Werth behalten. Beschreiben wir alsdann um den Unstetigkeitspunkt eine geschlossene Fläche, deren Dimensionen sehr klein gegen die Dimensionen des ganzen Körpers sind, sehr gross hingegen im Vergleich zu den Dimensionen des Theils, in welchem die Kräfte angreifen, so können die Deformationen ausserhalb und innerhalb dieser Fläche ganz unabhängig von einander betrachtet werden. Ausserhalb hängen die Deformationen ab von der Gestalt des Gesammtkörpers, der Vertheilung der übrigen Kräfte und den endlichen Integralen der Kraftcomponenten im Unstetigkeitspunkte, innerhalb hängen sie nur ab von der Vertheilung der im Innern selbst angreifenden Kräfte. Die Drucke und Deformationen im Innern sind gegen die im Aeussern unendlich gross.

Im Folgenden wollen wir einen hierher gehörigen Fall behandeln, der praktisches Interesse hat*), den Fall nämlich, dass zwei elastische isotrope Körper sich in einem sehr kleinen Theil ihrer Oberfläche berühren, und durch diesen Theil einen endlichen Druck der eine auf den andern ausüben. Die sich berührenden Oberflächen stellen wir uns als vollkommen glatt vor, d. h. wir nehmen nur einen senkrechten Druck zwischen den sich berührenden Theilen an. Das beiden Körpern nach der Deformation gemeinsame Stück der Oberfläche wollen wir die Druckfläche, die Begrenzung



$$F = \frac{4}{3}\frac{E^* a^3}{R}$$

Kontaktfläche: $A = \pi a^2$

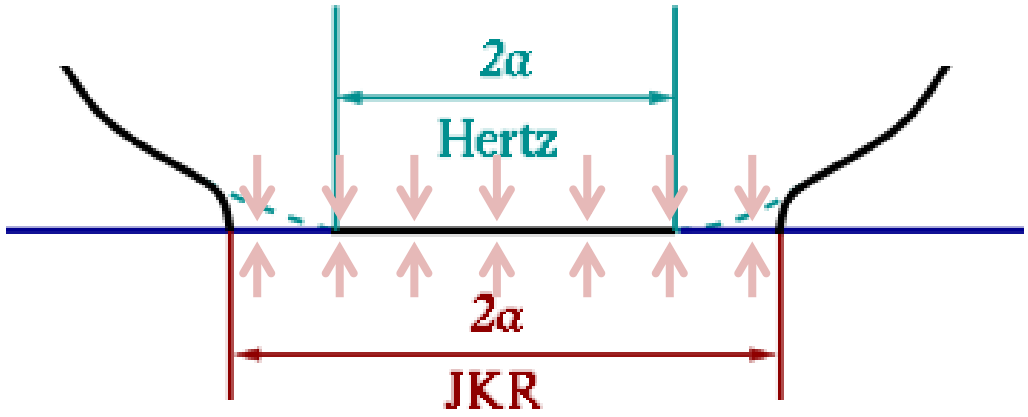
Kontaktmechanik

2. Modell von Johnson, Kendall und Roberts (1971)

Berücksichtigung adhäsiver Anziehungskräfte (van der Waals)

Kontaktfläche:

$A_{JKR} > A_{Hertz}$



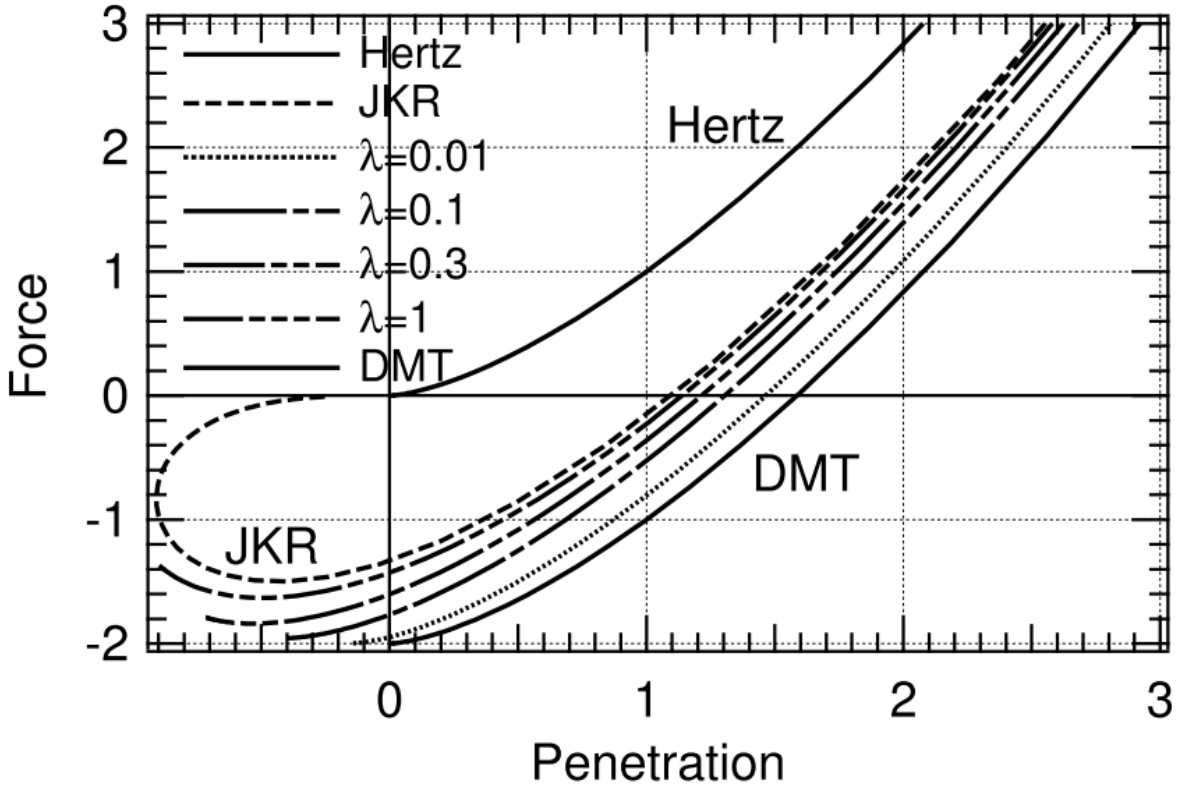
$$F = \frac{4}{3}\frac{E^* a^3}{R} - 2\sqrt{2\pi E^* W_{ad} a^3}$$

Hertz JKR

Adhäsionskraft: $F_c = -\frac{3}{2}\pi R W_{ad}$

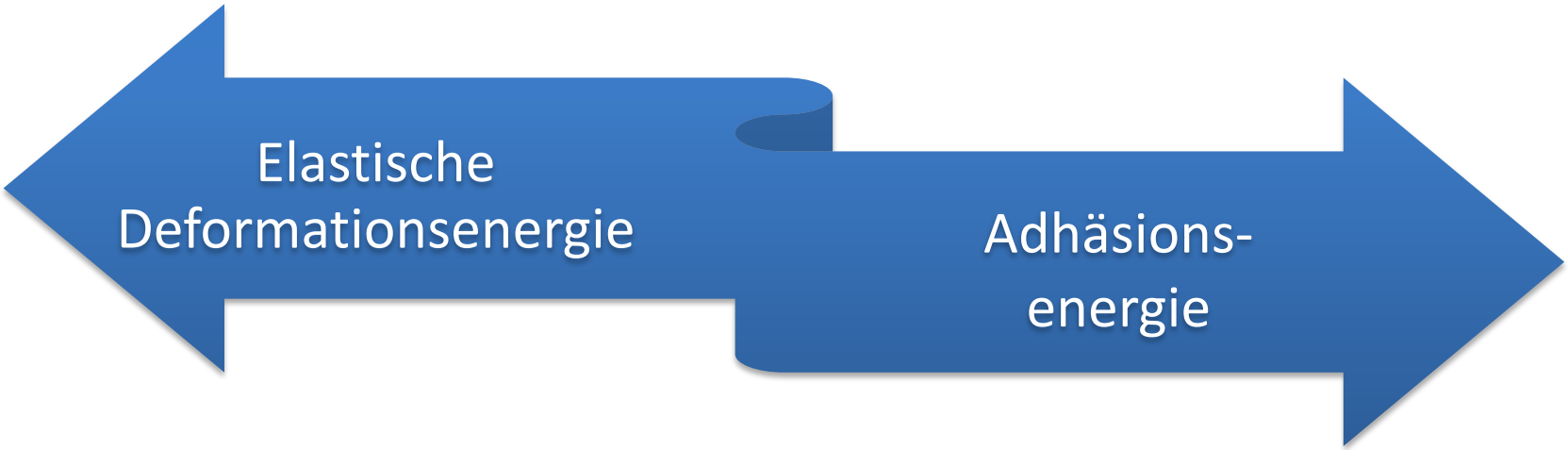
Kontaktmechanik

3. Vergleich der Modelle



Größeneffekt

$$F = \frac{4}{3}\frac{E^* a^3}{R} - 2\sqrt{2\pi E^* W_{ad} a^3}$$

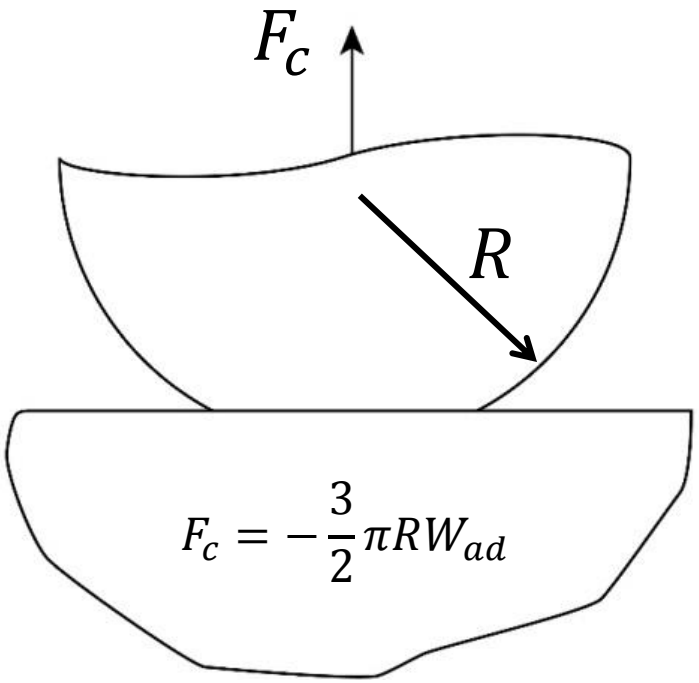


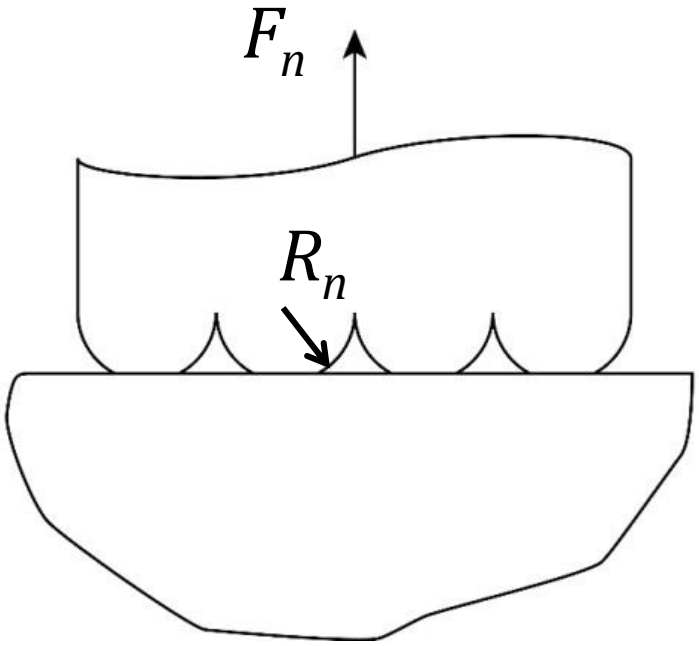
Notwendig: Deformationsenergie $\sim a^3$

Ziel: Kontaktfläche $\sim a^{3/2}$

→ Kleine Systeme adhärieren immer („stiction“)

Größeneffekt





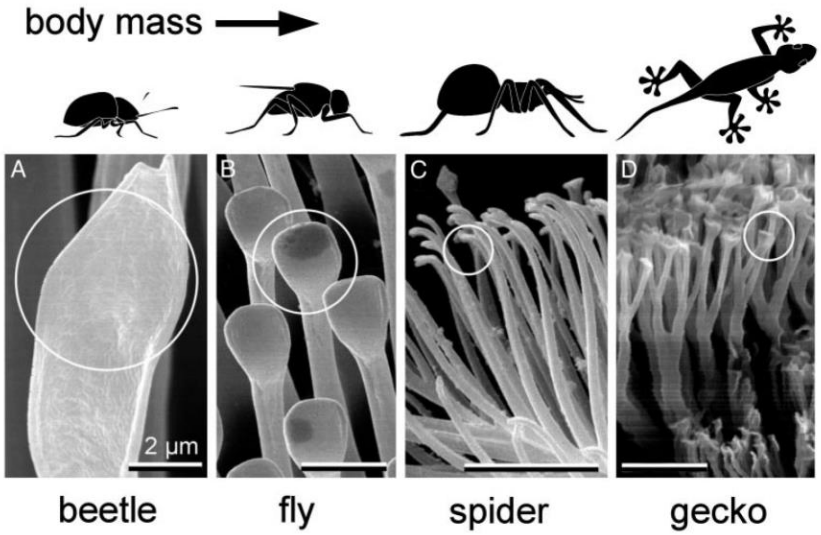
Selbstähnliche Skalierung: $n = \frac{R^2}{R_n^2}$

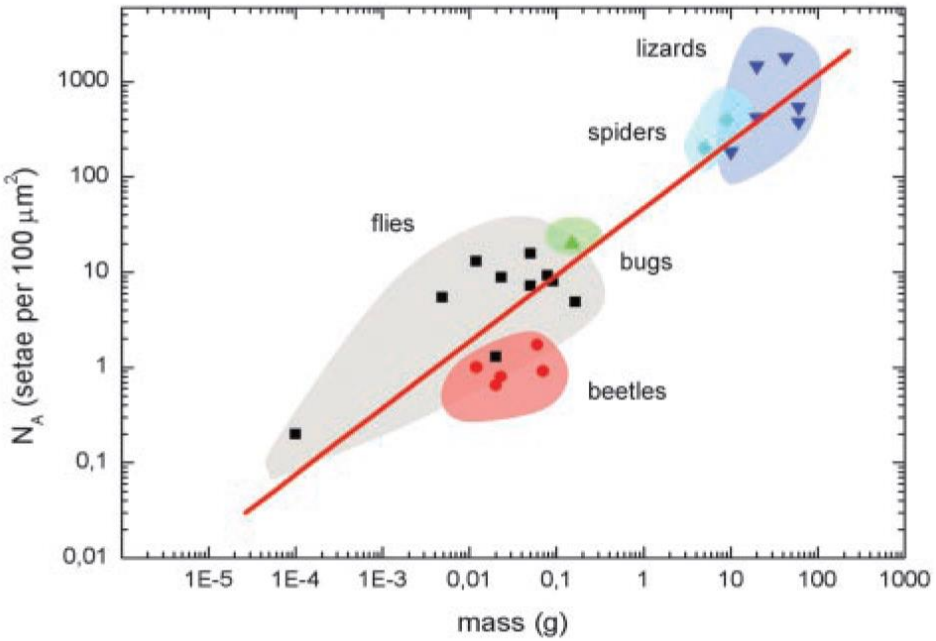
$$F_n = \sqrt{n} F_c$$

Arzt, Gorb, Spolenak, PNAS, 2003

Größeneffekt - Natur

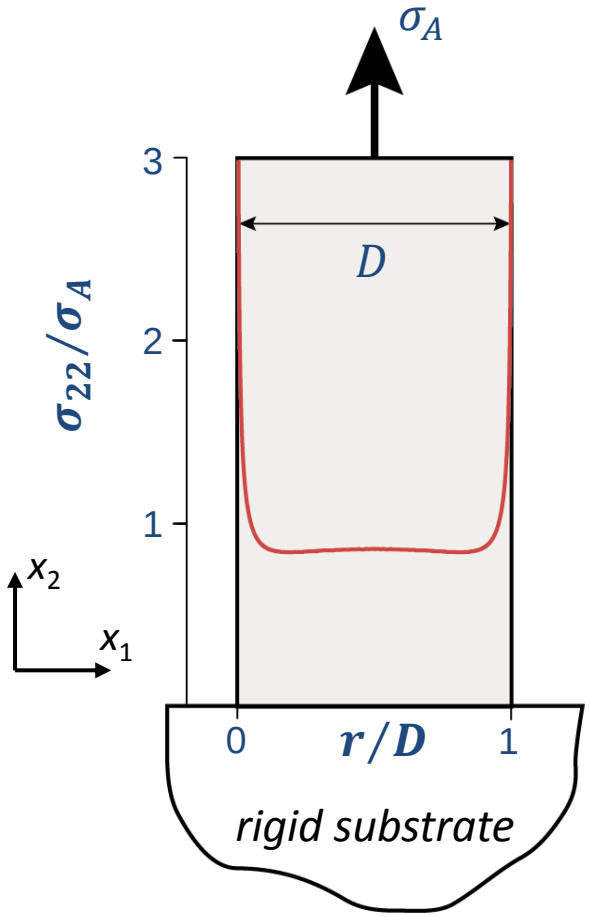
$$N_A = 4\kappa^2 m^{2/3},$$

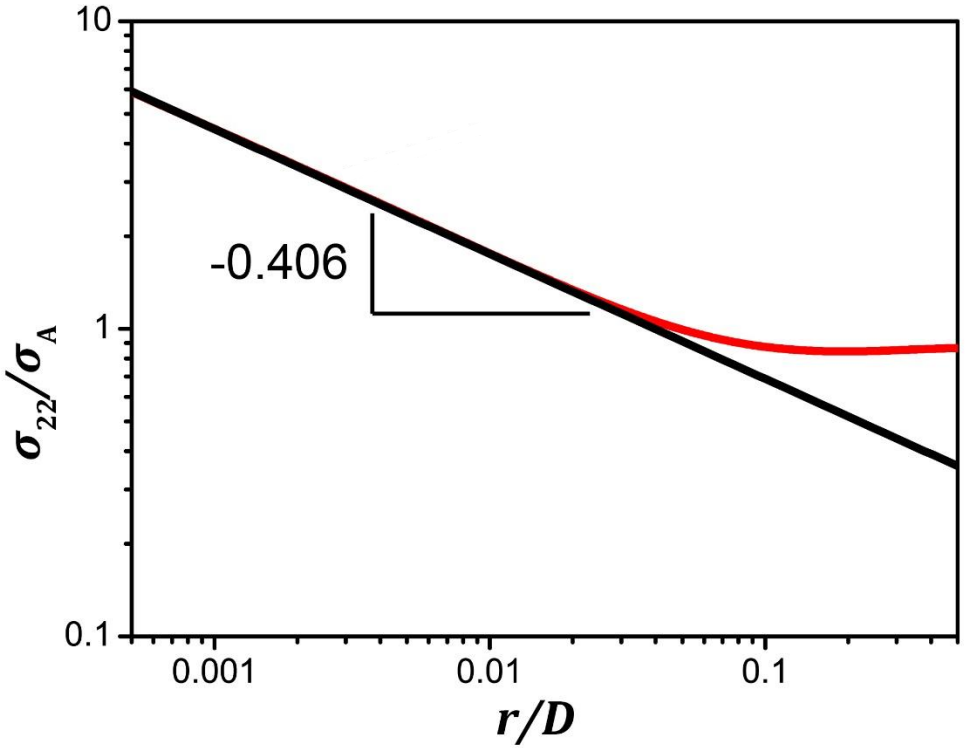




Arzt, Gorb, Spolenak, PNAS, 2003

Größeneffekt – künstl. Haftstrukturen

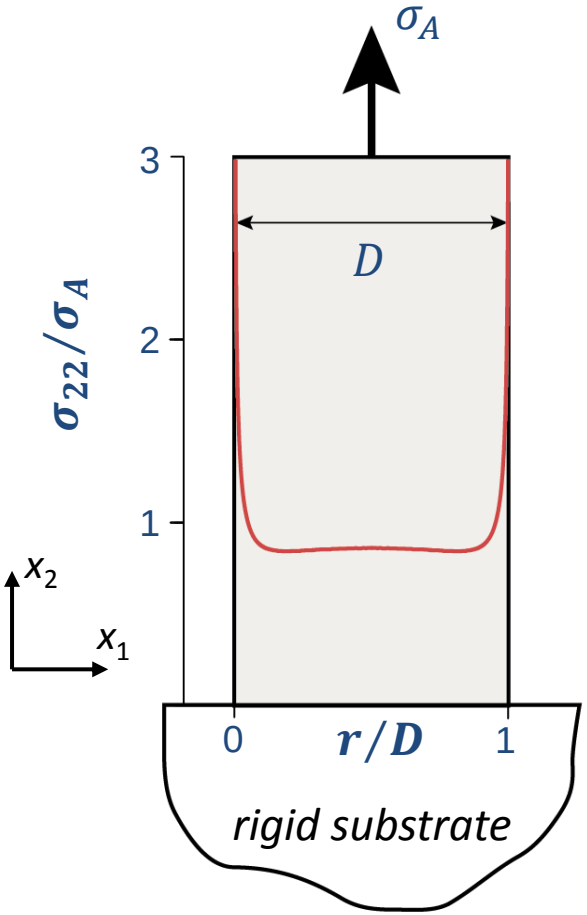




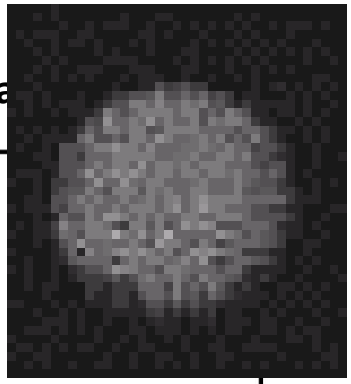
Khaderi, Fleck, Arzt, McMeeking, **JMPS**, 2015

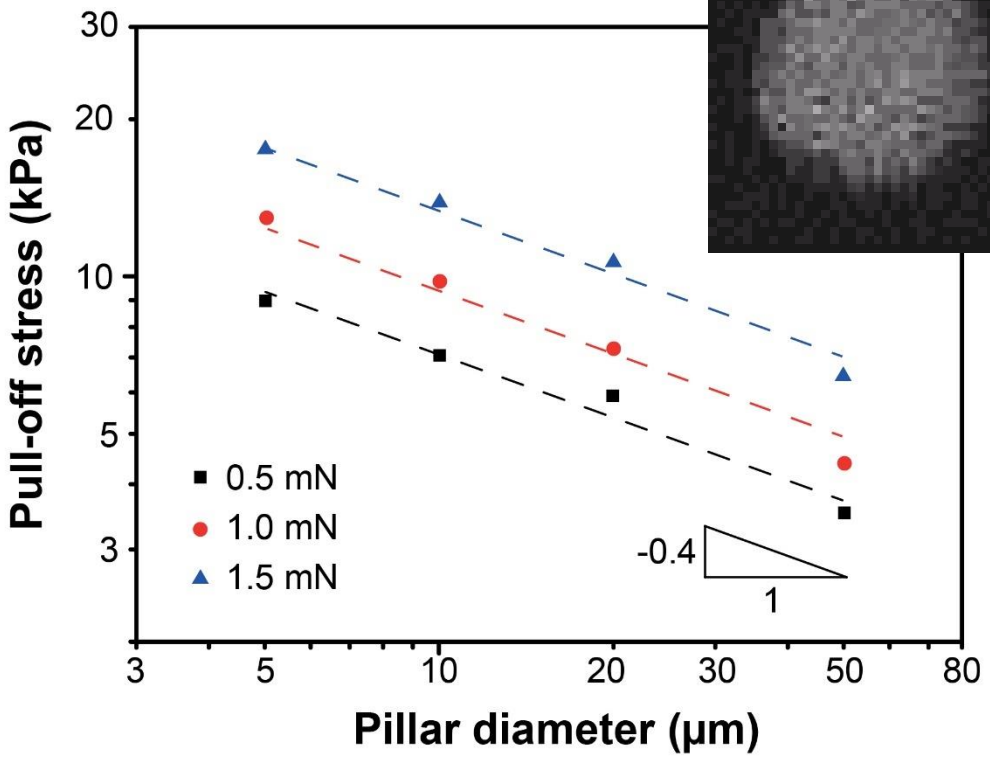
$$\sigma_p = \frac{0.6\sqrt{EW_{ad}}}{D^{0.406} l^{0.094} \tilde{a}}$$

Größeneffekt – künstl. Haftstrukturen



Greiner, del Campo, Arzt, **La**

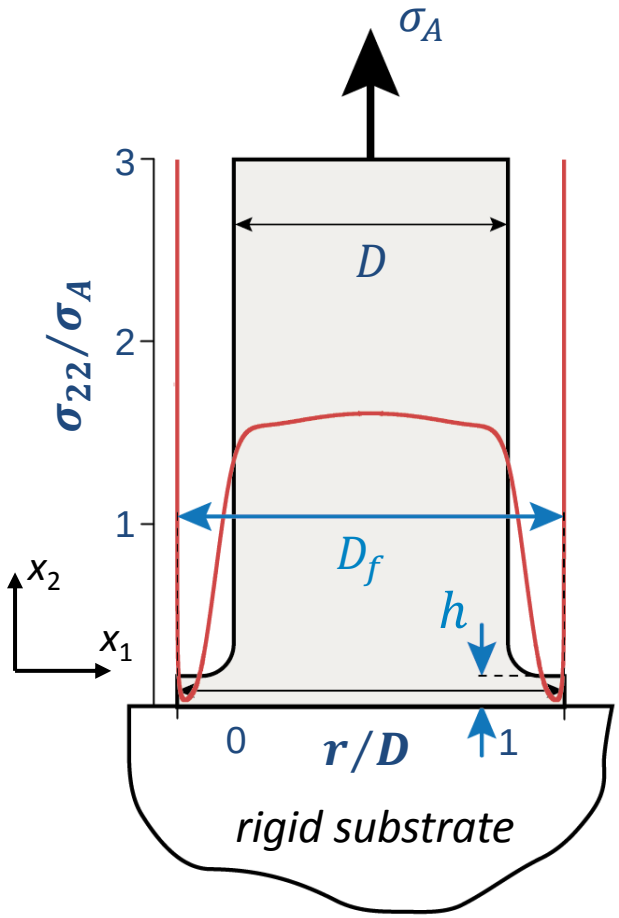


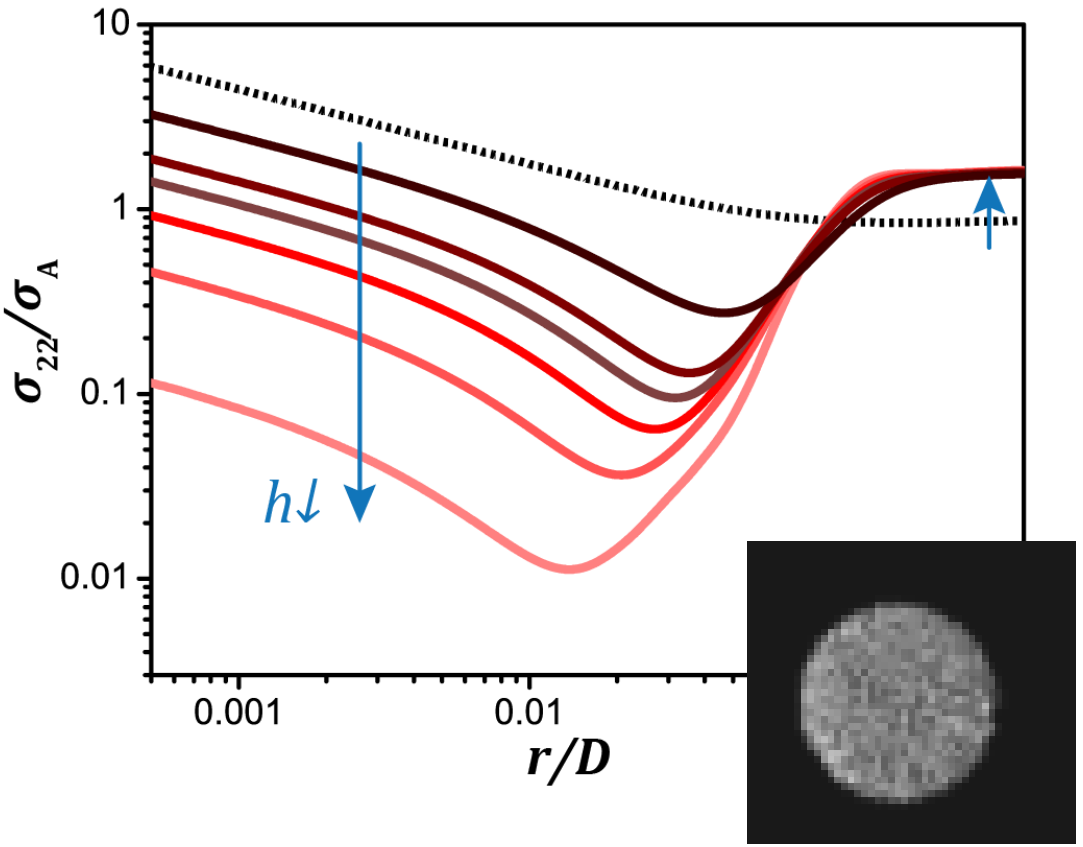


Khaderi, Fleck, Arzt, McMeeking, **JMPS**, 2015

$$\sigma_p = \frac{0.6\sqrt{Ew}}{D^{0.406} l^{0.094} \tilde{a}}$$

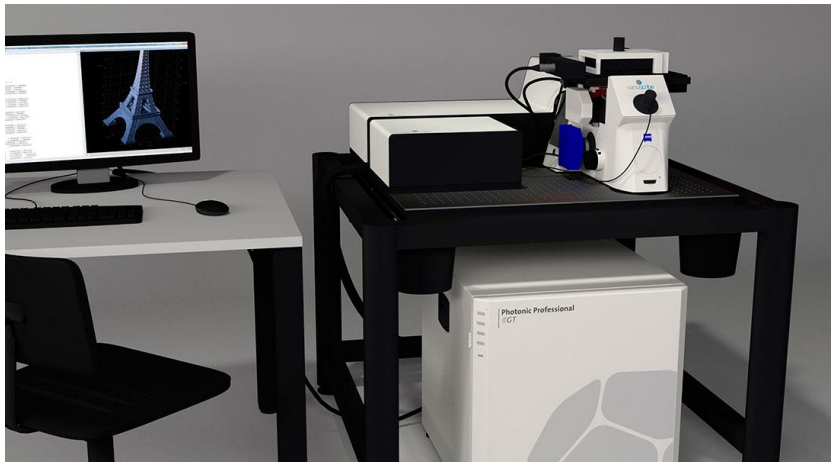
Größeneffekt – künstl. Haftstrukturen

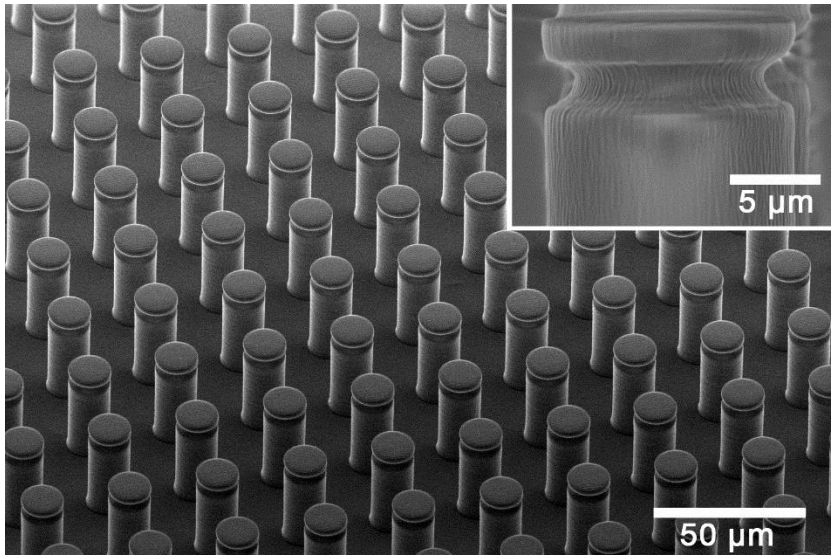




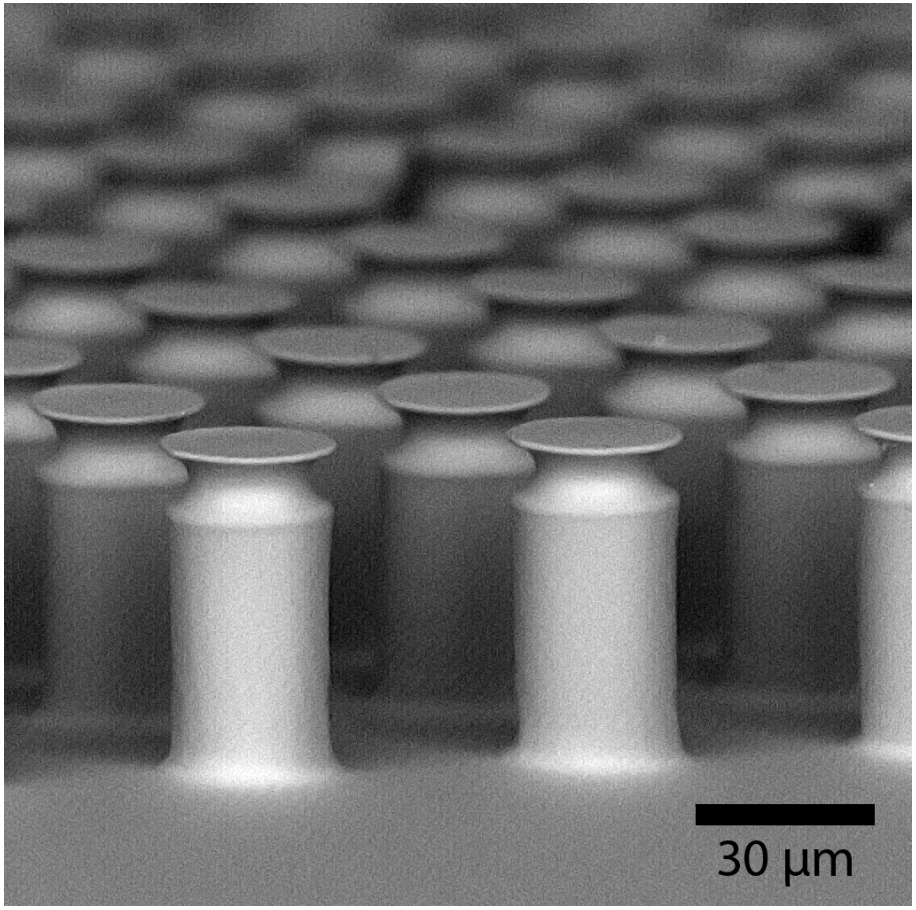
Balijepalli, Begley, Fleck, McMeeking, Arzt, **IJSS**, 2016

Herstellung fibrillärer Strukturen





2-Photonenlithographie



Aktuelle Fragestellungen

- Adhäsion zu verschiedensten Oberflächen:
  - rau, weich, Haut, Papier, …
- Adhäsionsverhalten bei verschiedenen Umwelbedingungen: Temperaturen, im Vakuum, im Weltraum, Unterwasser, …
- Neuartige Strukturdesigns
- Betrachtung von Systemparametern: Ausrichtung, Maschinensteifigkeit, …
- Schaltbare Adhäsion
- Modellierung und Kontaktmechanik
- Kombination mit elektr. Eigenschaften