

Casimir - Effekt

Alexander Stark

Institut für Physik
Humboldt-Universität zu Berlin

14.01.2008

Inhaltsverzeichnis

- 1 Gedankenexperiment von Casimir

Inhaltsverzeichnis

- 1 Gedankenexperiment von Casimir
- 2 Vakuumfluktuationen

Inhaltsverzeichnis

- 1 Gedankenexperiment von Casimir
- 2 Vakuumfluktuationen
- 3 Moderne Experimente

Inhaltsverzeichnis

- 1 Gedankenexperiment von Casimir
- 2 Vakuumfluktuationen
- 3 Moderne Experimente
- 4 Ausblick

Inhaltsverzeichnis

- 1 Gedankenexperiment von Casimir
- 2 Vakuumfluktuationen
- 3 Moderne Experimente
- 4 Ausblick
- 5 Zusammenfassung

Inhaltsverzeichnis

- 1 Gedankenexperiment von Casimir
- 2 Vakuumfluktuationen
- 3 Moderne Experimente
- 4 Ausblick
- 5 Zusammenfassung
- 6 Literatur

Geschichtliches



Hendrik Brugt Gerhard
Casimir (1909-2000)

- niederländischer Physiker, arbeitete bei den Philips Research Laboratories

Geschichtliches



Hendrik Brugt Gerhard
Casimir (1909-2000)

- niederländischer Physiker, arbeitete bei den Philips Research Laboratories
- untersuchte in den vierziger Jahren Eigenschaften von viskosen Materialien wie Mayonnaise
- diese Eigenschaften werden durch die „van der Waals“-Kraft festgelegt

Geschichtliches



Hendrik Brugt Gerhard
Casimir (1909-2000)

- niederländischer Physiker, arbeitete bei den Philips Research Laboratories
- untersuchte in den vierziger Jahren Eigenschaften von viskosen Materialien wie Mayonnaise
- diese Eigenschaften werden durch die „van der Waals“-Kraft festgelegt
- diese Theorie konnte nur unzureichend experimentelle Ergebnisse erklären
- Berücksichtigung von Vakuumfluktuationen

Zwei Platten - Gedankenexperiment von Casimir

Zwei Platten - Gedankenexperiment (1948)



- zwei planparallele Platten, ideal leitend und ungeladen in Vakuum

Zwei Platten - Gedankenexperiment (1948)



- zwei planparallele Platten, ideal leitend und ungeladen in Vakuum
- anziehende Kraft zwischen den Platten \Rightarrow Casimir-Kraft

Casimir-Kraft:

$$F = \frac{\hbar c \pi^2}{240 d^4} A$$

Zwei Platten - Gedankenexperiment (1948)



Casimir-Kraft:

$$F = \frac{\hbar c \pi^2}{240 d^4} A$$

- zwei planparallele Platten, ideal leitend und ungeladen in Vakuum
- anziehende Kraft zwischen den Platten \Rightarrow Casimir-Kraft
- *Eigenschaften:*
 - ▶ nur abhängig vom Abstand und Fläche der Platten

Zwei Platten - Gedankenexperiment (1948)



Casimir-Kraft:

$$F = \frac{\hbar c \pi^2}{240 d^4} A$$

- zwei planparallele Platten, ideal leitend und ungeladen in Vakuum
- anziehende Kraft zwischen den Platten \Rightarrow Casimir-Kraft
- *Eigenschaften:*
 - ▶ nur abhängig vom Abstand und Fläche der Platten
 - ▶ sehr geringe Kraft auf makroskopischer Ebene
($A = 1\text{cm}^2$ im Abstand $d = 0.5\mu\text{m} \Rightarrow F = 2 \cdot 10^{-6}\text{N}$)

Zwei Platten - Gedankenexperiment (1948)

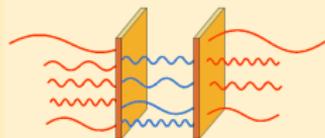


Casimir-Kraft:

$$F = \frac{\hbar c \pi^2}{240 d^4} A$$

- zwei planparallele Platten, ideal leitend und ungeladen in Vakuum
 - anziehende Kraft zwischen den Platten \Rightarrow Casimir-Kraft
 - *Eigenschaften:*
 - ▶ nur abhängig vom Abstand und Fläche der Platten
 - ▶ sehr geringe Kraft auf makroskopischer Ebene
($A = 1\text{cm}^2$ im Abstand $d = 0.5\mu\text{m} \Rightarrow F = 2 \cdot 10^{-6}\text{N}$)
 - ▶ keine Abhängigkeit von Temperatur & Material, aber von der Geometrie
- \Rightarrow kein Effekt der Hohlraumstrahlung

Zwei Platten - Gedankenexperiment (1948)



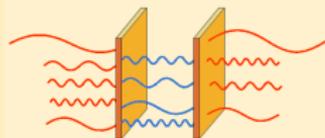
Casimir-Kraft:

$$F = \frac{\hbar c \pi^2}{240 d^4} A$$

- zwei planparallele Platten, ideal leitend und ungeladen in Vakuum
 - anziehende Kraft zwischen den Platten \Rightarrow Casimir-Kraft
 - *Eigenschaften:*
 - ▶ nur abhängig vom Abstand und Fläche der Platten
 - ▶ sehr geringe Kraft auf makroskopischer Ebene
($A = 1 \text{ cm}^2$ im Abstand $d = 0.5 \mu\text{m} \Rightarrow F = 2 \cdot 10^{-6} \text{ N}$)
 - ▶ keine Abhängigkeit von Temperatur & Material, aber von der Geometrie
- \Rightarrow kein Effekt der Hohlraumstrahlung

Ursache der Kraft ist eine Eigenschaft des Vakuums
Vakuumfluktuationen erzeugen den Casimir-Effekt

Vakuumschwankungen

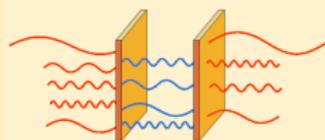


**Energie-Zeit-
Unschärfe:**

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$$

- Heisenbergsche Unschärferelation
⇒ Felder weisen Fluktuationen auf

Vakuumfluktuationen

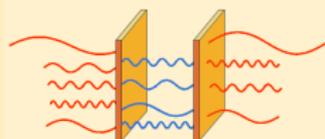


**Energie-Zeit-
Unschärfe:**

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$$

- Heisenbergsche Unschärferelation
⇒ Felder weisen Fluktuationen auf
- elektrisches Feld verschwindet im Mittel:
 $\langle 0 | \vec{E} | 0 \rangle = 0$, aber $\langle 0 | \vec{E}^2 | 0 \rangle > 0$

Vakuumschwankungen



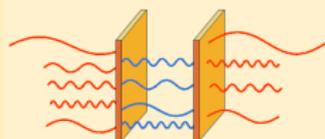
**Energie-Zeit-
Unschärfe:**

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$$

- Heisenbergsche Unschärferelation
 \Rightarrow Felder weisen Fluktuationen auf
- elektrisches Feld verschwindet im Mittel:
 $\langle 0 | \vec{E} | 0 \rangle = 0$, aber $\langle 0 | \vec{E}^2 | 0 \rangle > 0$
- Hamilton-Operator:

$$\hat{H} = \frac{1}{2} \int dV (\epsilon_0 \vec{E}^2 + \mu_0 \vec{H}^2)$$

Vakuumschwankungen



Energie-Zeit- Unschärfe:

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$$

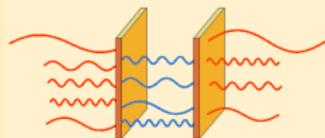
- Heisenbergsche Unschärferelation
 \Rightarrow Felder weisen Fluktuationen auf
- elektrisches Feld verschwindet im Mittel:
 $\langle 0 | \vec{E} | 0 \rangle = 0$, aber $\langle 0 | \vec{E}^2 | 0 \rangle > 0$
- Hamilton-Operator:

$$\hat{H} = \frac{1}{2} \int dV (\epsilon_0 \vec{E}^2 + \mu_0 \vec{H}^2)$$

- Erwartungswert der Energie:

$$\langle 0 | \hat{H} | 0 \rangle = E_0 = \sum \frac{1}{2} \hbar \omega$$

Vakuumschwankungen



**Energie-Zeit-
Unschärfe:**

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$$

- Heisenbergsche Unschärferelation
 \Rightarrow Felder weisen Fluktuationen auf
- elektrisches Feld verschwindet im Mittel:
 $\langle 0 | \vec{E} | 0 \rangle = 0$, aber $\langle 0 | \vec{E}^2 | 0 \rangle > 0$
- Hamilton-Operator:

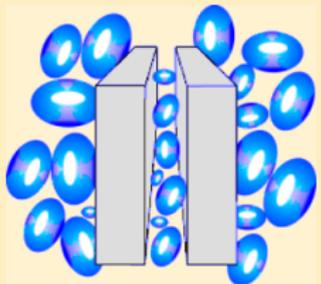
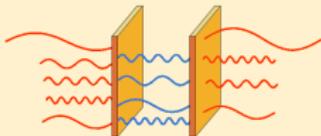
$$\hat{H} = \frac{1}{2} \int dV (\epsilon_0 \vec{E}^2 + \mu_0 \vec{H}^2)$$

- Erwartungswert der Energie:

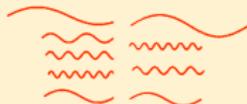
$$\langle 0 | \hat{H} | 0 \rangle = E_0 = \sum \frac{1}{2} \hbar \omega$$

- Vakuumschwankungen tragen Energie und Impuls
 \Rightarrow erzeugen Strahlungsdruck

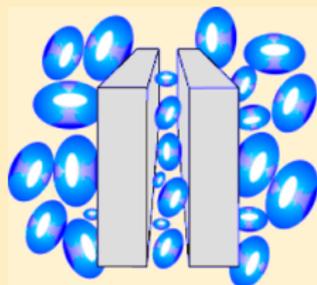
Vakuumfluktuationen



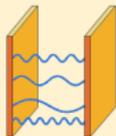
Vakuumfluktuationen



- außerhalb der Platten, im freien Raum
- ⇒ beliebige Frequenzen ω des Vakuumfeldes

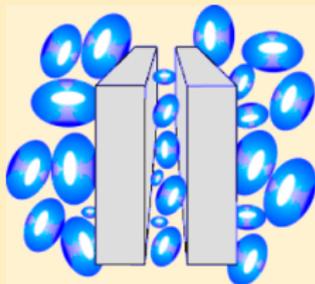


Vakuumfluktuationen

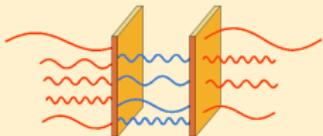


- außerhalb der Platten, im freien Raum
- ⇒ beliebige Frequenzen ω des Vakuumfeldes
- innerhalb der Platten (Randbedingungen)
- ⇒ nur bestimmte (resonante) Frequenzen des Vakuumfeldes ($k = n\pi/d$)

$$\omega_n = ck_n = c\frac{n\pi}{d}$$

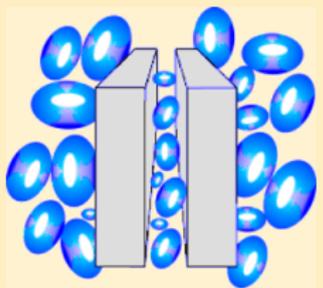


Vakuumfluktuationen



- außerhalb der Platten, im freien Raum
- ⇒ beliebige Frequenzen ω des Vakuumfeldes
- innerhalb der Platten (Randbedingungen)
- ⇒ nur bestimmte (resonante) Frequenzen des Vakuumfeldes ($k = n\pi/d$)

$$\omega_n = ck_n = c\frac{n\pi}{d}$$



- Bilanzrechnung des Strahlungsdrucks liefert einen negativen Druck (anziehende Kraft) zwischen den Platten

Herleitung der Casimir-Kraft

1D: Zwei Punkte im Abstand d

Herleitung der Casimir-Kraft

1D: Zwei Punkte im Abstand d

Resonator (cavity):

$$E_{cav} = \frac{1}{2} \hbar \frac{c\pi}{d} \sum_{n=1}^{\infty} n$$

Herleitung der Casimir-Kraft

1D: Zwei Punkte im Abstand d

Resonator (cavity):

$$E_{cav} = \frac{1}{2} \hbar \frac{c\pi}{d} \sum_{n=1}^{\infty} n$$

Freier Raum:

$$E_{free} = \frac{1}{2} \hbar \frac{c\pi}{d} \int_0^{\infty} n \, dn$$

Herleitung der Casimir-Kraft

1D: Zwei Punkte im Abstand d

Resonator (cavity):

$$E_{cav} = \frac{1}{2} \hbar \frac{c\pi}{d} \sum_{n=1}^{\infty} n$$

Freier Raum:

$$E_{free} = \frac{1}{2} \hbar \frac{c\pi}{d} \int_0^{\infty} n \, dn$$

⇒ beide Energien divergent (auch $\Delta E = E_{cav} - E_{free} \rightarrow \infty$)

Herleitung der Casimir-Kraft

1D: Zwei Punkte im Abstand d

Resonator (cavity):

$$E_{cav} = \frac{1}{2} \hbar \frac{c\pi}{d} \sum_{n=1}^{\infty} n e^{-\alpha n}$$

Freier Raum:

$$E_{free} = \frac{1}{2} \hbar \frac{c\pi}{d} \int_0^{\infty} n e^{-\alpha n} dn$$

⇒ beide Energien divergent (auch $\Delta E = E_{cav} - E_{free} \rightarrow \infty$)

⇒ Renormierung

Herleitung der Casimir-Kraft

1D: Zwei Punkte im Abstand d

Resonator (cavity):

$$E_{cav} = \frac{1}{2} \hbar \frac{c\pi}{d} \sum_{n=1}^{\infty} n e^{-\alpha n}$$

Freier Raum:

$$E_{free} = \frac{1}{2} \hbar \frac{c\pi}{d} \int_0^{\infty} n e^{-\alpha n} dn$$

⇒ beide Energien divergent (auch $\Delta E = E_{cav} - E_{free} \rightarrow \infty$)

⇒ Renormierung

$$\Delta E = E_{cav} - E_{free} = \frac{\hbar c \pi}{2d} \left(\sum_{n=1}^{\infty} n e^{-\alpha n} - \int_0^{\infty} n e^{-\alpha n} dn \right)$$

$$\Delta E = E_{cav} - E_{free} = \frac{\hbar c \pi}{2d} \left(\sum_{n=1}^{\infty} n e^{-\alpha n} - \int_0^{\infty} n e^{-\alpha n} dn \right)$$

$$\Delta E = E_{cav} - E_{free} = \frac{\hbar c \pi}{2d} \left(\sum_{n=1}^{\infty} n e^{-\alpha n} - \int_0^{\infty} n e^{-\alpha n} dn \right)$$

Euler-MacLaurin Formel:

$$\sum_{n=1}^{\infty} f(n) - \int_0^{\infty} f(n) dn = -\frac{1}{2} f(0) - \frac{1}{2!} B_2 \frac{d f(0)}{dl} - \frac{1}{4!} B_4 \frac{d^3 f(0)}{dl} + \dots$$

mit den Bernoulli-Zahlen $B_2 = 1/6$ und $B_4 = -1/30$

$$\Delta E = E_{cav} - E_{free} = \frac{\hbar c \pi}{2d} \left(\sum_{n=1}^{\infty} n e^{-\alpha n} - \int_0^{\infty} n e^{-\alpha n} dn \right)$$

Euler-MacLaurin Formel:

$$\sum_{n=1}^{\infty} f(n) - \int_0^{\infty} f(n) dn = -\frac{1}{2} f(0) - \frac{1}{2!} B_2 \frac{d f(0)}{dl} - \frac{1}{4!} B_4 \frac{d^3 f(0)}{dl} + \dots$$

mit den Bernoulli-Zahlen $B_2 = 1/6$ und $B_4 = -1/30$ liefert

$$\Delta E = -\frac{\hbar c \pi}{24d} \left(1 + \frac{\alpha^2}{20} + \mathcal{O}(\alpha^4) \right)$$

$$\Delta E = E_{cav} - E_{free} = \frac{\hbar c \pi}{2d} \left(\sum_{n=1}^{\infty} n e^{-\alpha n} - \int_0^{\infty} n e^{-\alpha n} dn \right)$$

Euler-MacLaurin Formel:

$$\sum_{n=1}^{\infty} f(n) - \int_0^{\infty} f(n) dn = -\frac{1}{2} f(0) - \frac{1}{2!} B_2 \frac{d f(0)}{dl} - \frac{1}{4!} B_4 \frac{d^3 f(0)}{dl} + \dots$$

mit den Bernoulli-Zahlen $B_2 = 1/6$ und $B_4 = -1/30$ liefert

$$\Delta E = -\frac{\hbar c \pi}{24d} \left(1 + \frac{\alpha^2}{20} + \mathcal{O}(\alpha^4) \right) \underset{\alpha \rightarrow 0}{=} -\frac{\pi \hbar c}{24d}$$

$$\Delta E = E_{cav} - E_{free} = \frac{\hbar c \pi}{2d} \left(\sum_{n=1}^{\infty} n e^{-\alpha n} - \int_0^{\infty} n e^{-\alpha n} dn \right)$$

Euler-MacLaurin Formel:

$$\sum_{n=1}^{\infty} f(n) - \int_0^{\infty} f(n) dn = -\frac{1}{2}f(0) - \frac{1}{2!}B_2 \frac{d f(0)}{dl} - \frac{1}{4!}B_4 \frac{d^3 f(0)}{dl} + \dots$$

mit den Bernoulli-Zahlen $B_2 = 1/6$ und $B_4 = -1/30$ liefert

$$\Delta E = -\frac{\hbar c \pi}{24d} \left(1 + \frac{\alpha^2}{20} + \mathcal{O}(\alpha^4) \right) \underset{\alpha \rightarrow 0}{=} -\frac{\pi \hbar c}{24d}$$

⇒ Casimir-Kraft in 1 Dimension:

$$F = -\frac{\partial \Delta E}{\partial d} = -\frac{\hbar c \pi}{24d^2}$$

3D: Spiegel der Fläche A im Abstand d

$$\Delta E = E_{cav} - E_{free} = \frac{A c \hbar}{\pi^2} \left(\sum_{n=1}^{\infty} \int_0^{\infty} dk_x \int_0^{\infty} dk_y \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + \left(\frac{n\pi}{d}\right)^2} \right. \\ \left. - \frac{d}{\pi} \int_0^{\infty} dk_x \int_0^{\infty} dk_y \int_0^{\infty} dk_z \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2} \right) = -\frac{\hbar c \pi^2}{720 d^3} A$$

3D: Spiegel der Fläche A im Abstand d

$$\Delta E = E_{cav} - E_{free} = \frac{A c \hbar}{\pi^2} \left(\sum_{n=1}^{\infty} \int_0^{\infty} dk_x \int_0^{\infty} dk_y \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + \left(\frac{n\pi}{d}\right)^2} \right. \\ \left. - \frac{d}{\pi} \int_0^{\infty} dk_x \int_0^{\infty} dk_y \int_0^{\infty} dk_z \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2} \right) = -\frac{\hbar c \pi^2}{720 d^3} A$$

⇒ Casimir-Kraft in 3 Dimensionen:

$$F = -\frac{\partial \Delta E}{\partial d} = -\frac{\hbar c \pi^2}{240 d^4} A$$

Umar Mohideen und Anushree Roy (1998)¹

$$F_{Sp} = -\frac{\hbar c \pi^3 R}{360 d^3}$$

- Messung der Casimir-Kraft F_{Sp} zwischen einer Kugel und einer Platte

¹U. Mohideen, A. Roy, Precision Measurement of the Casimir Force, Phys. Rev. Lett. 1998, 81, 4549.

Umar Mohideen und Anushree Roy (1998)¹

$$F_{Sp} = -\frac{\hbar c \pi^3 R}{360 d^3}$$

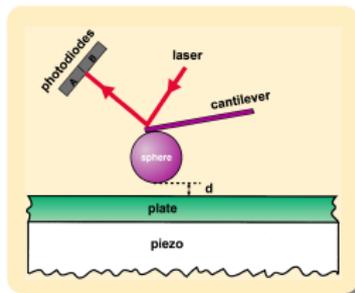
- Messung der Casimir-Kraft F_{Sp} zwischen einer Kugel und einer Platte
- Polyesterolkugel $R = (100 \pm 4)\mu m$ mit Gold beschichtet in Abständen d von $0.1\mu m$ bis $0.9\mu m$

¹U. Mohideen, A. Roy, Precision Measurement of the Casimir Force, Phys. Rev. Lett. 1998, 81, 4549.

Umar Mohideen und Anushree Roy (1998)¹

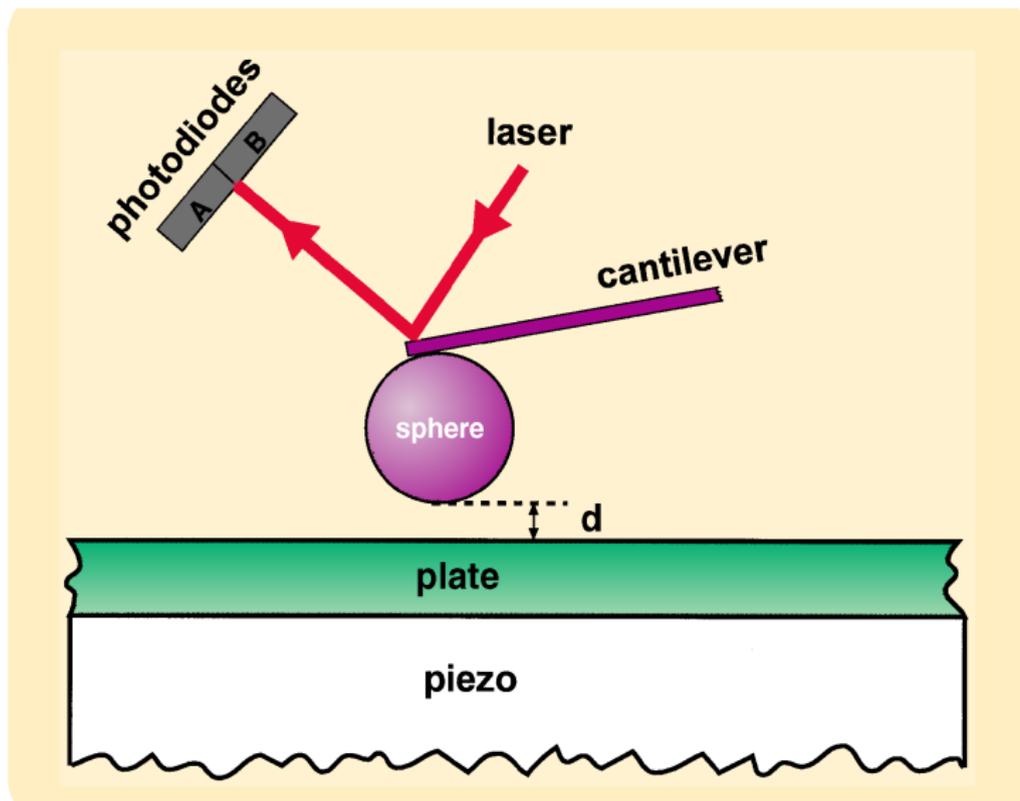
$$F_{Sp} = -\frac{\hbar c \pi^3 R}{360 d^3}$$

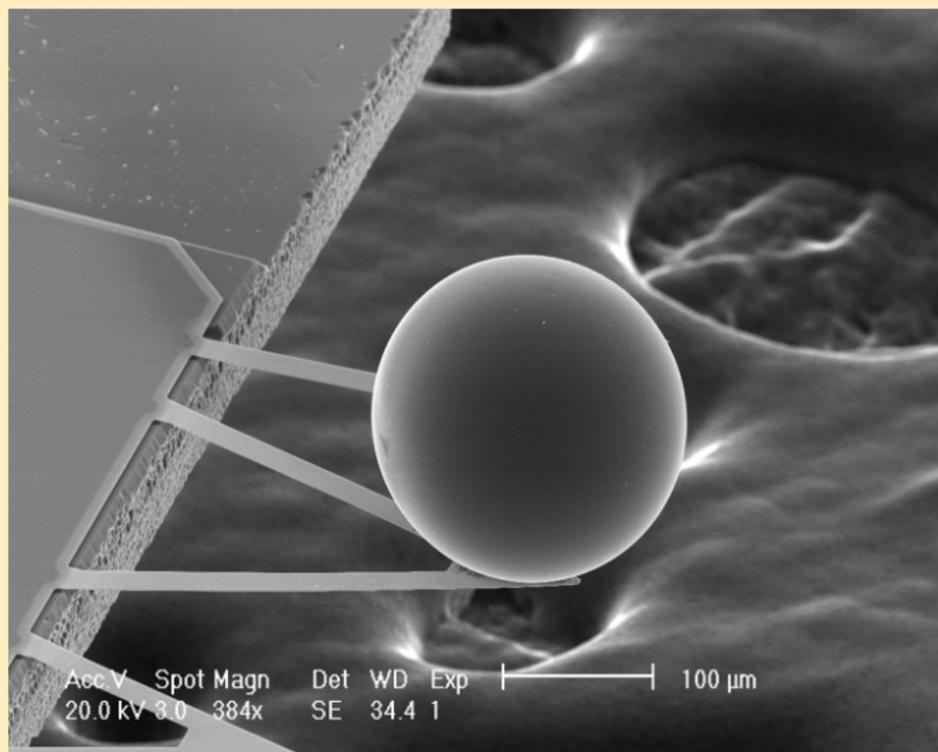
- Messung der Casimir-Kraft F_{Sp} zwischen einer Kugel und einer Platte
- Polyesterkugel $R = (100 \pm 4)\mu\text{m}$ mit Gold beschichtet in Abständen d von $0.1\mu\text{m}$ bis $0.9\mu\text{m}$



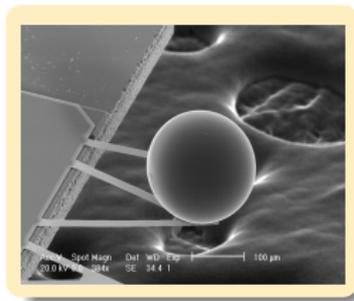
¹U. Mohideen, A. Roy, Precision Measurement of the Casimir Force, Phys. Rev. Lett. 1998, 81, 4549.

Umar Mohideen und Anushree Roy (1998)¹



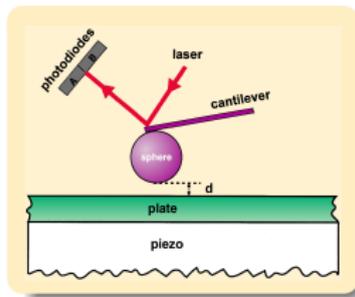
Umar Mohideen und Anushree Roy (1998)¹

Umar Mohideen und Anushree Roy (1998)¹



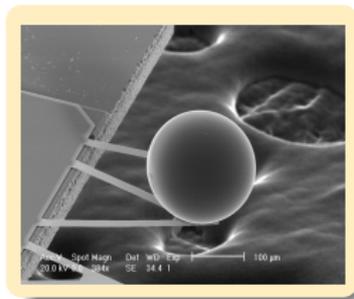
- Messung der Casimir-Kraft F_{Sp} zwischen einer Kugel und einer Platte
- Polyesterkugel $R = (100 \pm 4)\mu m$ mit Gold beschichtet in Abständen d von $0.1\mu m$ bis $0.9\mu m$
- Laserstrahl mißt die Auslenkung des Trägers (cantilever)

⇒ atomare Kraftmikroskopie



¹U. Mohideen, A. Roy, Precision Measurement of the Casimir Force, Phys. Rev. Lett. 1998, 81, 4549.

Umar Mohideen und Anushree Roy (1998)¹

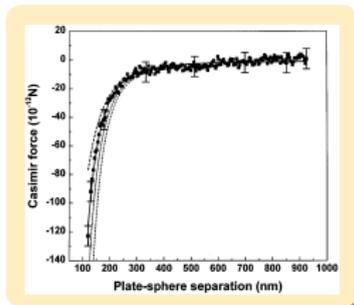


- Messung der Casimir-Kraft F_{Sp} zwischen einer Kugel und einer Platte
- Polystyrolkugel $R = (100 \pm 4)\mu m$ mit Gold beschichtet in Abständen d von $0.1\mu m$ bis $0.9\mu m$
- Laserstrahl mißt die Auslenkung des Trägers (cantilever)

⇒ atomare Kraftmikroskopie

Ergebnis:

Eine Abweichungen von nur 1% zwischen Experiment und Theorie



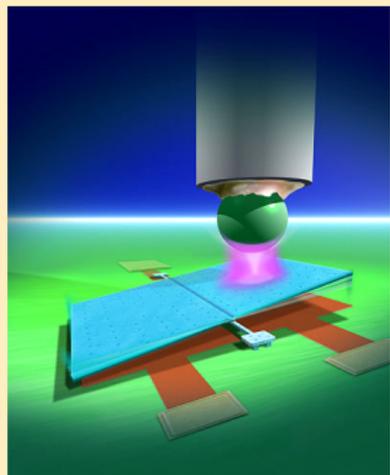
¹U. Mohideen, A. Roy, Precision Measurement of the Casimir Force, Phys. Rev. Lett. 1998, 81, 4549.

Frederico Capasso (2001)¹

- Untersuchung des Einflusses der Casimir-Kraft auf einen mikromechanischen Oszillator (MEMS = **M**icro-**E**lectro-**M**echanical **S**ystem)

¹H. B. Chan, V. A. Aksyuk, R. N. Kleiman, D. J. Bishop and F. Capasso, Nonlinear Micromechanical Casimir Oscillator, Phys. Rev. Lett. 2001, 87, 211801-1.

Frederico Capasso (2001)¹



- Untersuchung des Einflusses der Casimir-Kraft auf einen mikromechanischen Oszillator (MEMS = **M**icro-**E**lectro-**M**echanical **S**ystem)

¹H. B. Chan, V. A. Aksyuk, R. N. Kleiman, D. J. Bishop and F. Capasso, Nonlinear Micromechanical Casimir Oscillator, Phys. Rev. Lett. 2001, 87, 211801-1.

Frederico Capasso (2001)

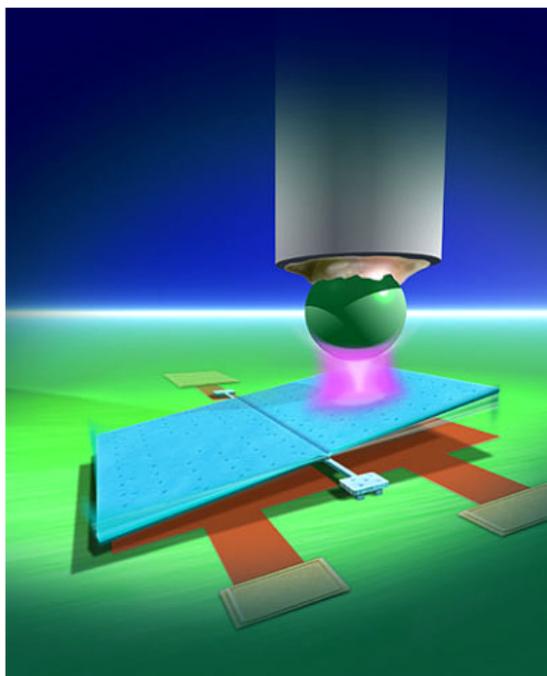
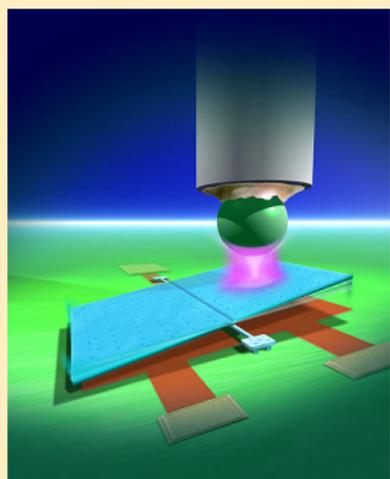


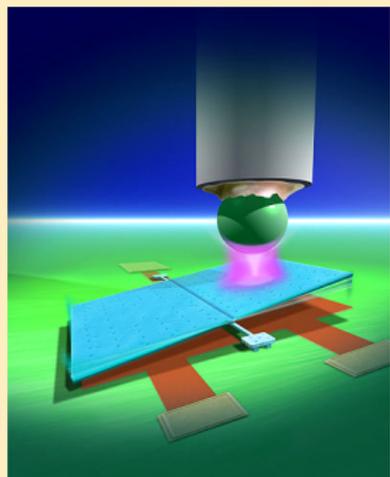
Abbildung: mikromech. Oszillator (Frederico Capasso, BellLabs)

Frederico Capasso (2001)¹

- Untersuchung des Einflusses der Casimir-Kraft auf einen mikromechanischen Oszillator (MEMS = **M**icro-**E**lectro-**M**echanical **S**ystem)
 - Oszillator: 3.5μ dick, $500\mu m^2$ Fläche
 - Polyesterolkugel: $R = 100\mu m$
- ⇒ goldbeschichtet

¹H. B. Chan, V. A. Aksyuk, R. N. Kleiman, D. J. Bishop and F. Capasso, Nonlinear Micromechanical Casimir Oscillator, Phys. Rev. Lett. 2001, 87, 211801-1.

Frederico Capasso (2001)¹



- Untersuchung des Einflusses der Casimir-Kraft auf einen mikromechanischen Oszillator (MEMS = **M**icro-**E**lectro-**M**echanical **S**ystem)
 - Oszillator: 3.5μ dick, $500\mu m^2$ Fläche
 - Polyesterolkugel: $R = 100\mu m$
- ⇒ goldbeschichtet
- Casimir-Kraft verändert Schwingungseigenschaften des Oszillators (nichtlineare Effekte)

Casimir-Kraft ermöglicht die Steuerung von Mikromaschinen und MEMS

¹H. B. Chan, V. A. Aksyuk, R. N. Kleiman, D. J. Bishop and F. Capasso, Nonlinear Micromechanical Casimir Oscillator, Phys. Rev. Lett. 2001, 87, 211801-1.

Frederico Capasso (2001)

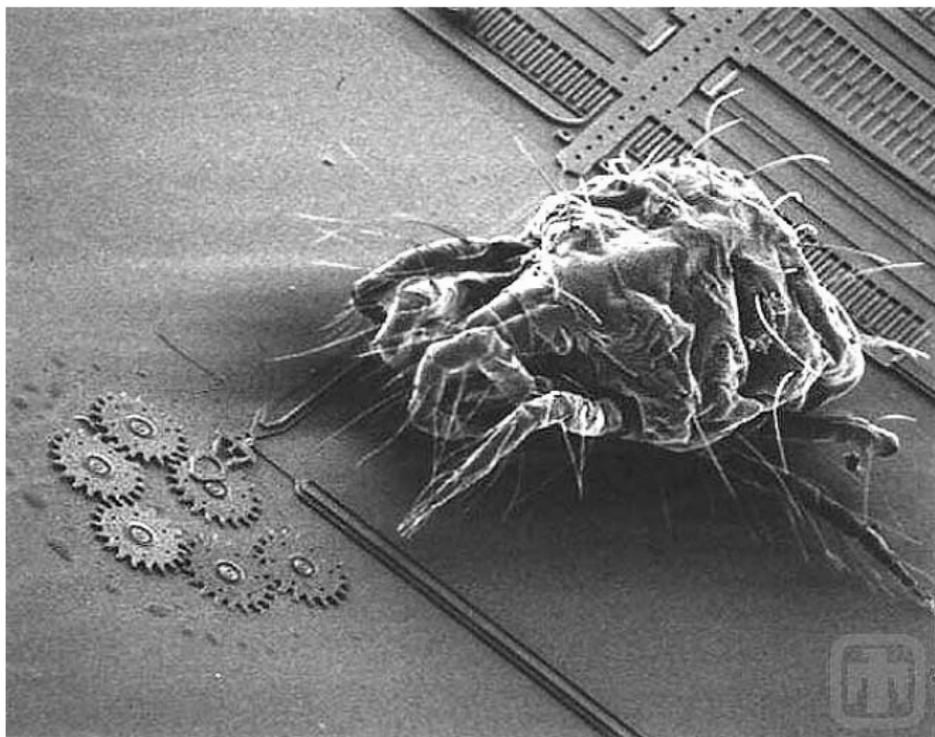


Abbildung: MEMS und Käfer (Sandia National Laboratories)

Ausblick

- Existenz neuer fundamentaler Kräfte
 - ▶ Abweichungen des Gravitationsgesetzes auf kleinen Abständen

Ausblick

- Existenz neuer fundamentaler Kräfte
 - ▶ Abweichungen des Gravitationsgesetzes auf kleinen Abständen
- Levitation bei MEMS und NEMS
 - ▶ Einsatz von Meta-Materialien ($\epsilon_r = \mu_r = -1$, left-handed) zwischen den Platten erzeugt repulsive Casimir-Kraft

Ausblick

- Existenz neuer fundamentaler Kräfte
 - ▶ Abweichungen des Gravitationsgesetzes auf kleinen Abständen
- Levitation bei MEMS und NEMS
 - ▶ Einsatz von Meta-Materialien ($\epsilon_r = \mu_r = -1$, left-handed) zwischen den Platten erzeugt repulsive Casimir-Kraft
- Lösung des Energieproblems?
 - ▶ unwahrscheinlich, Gegenstand der Forschung, Breakthrough Propulsion Physics Project NASA

Ausblick

- Existenz neuer fundamentaler Kräfte
 - ▶ Abweichungen des Gravitationsgesetzes auf kleinen Abständen
- Levitation bei MEMS und NEMS
 - ▶ Einsatz von Meta-Materialien ($\epsilon_r = \mu_r = -1$, left-handed) zwischen den Platten erzeugt repulsive Casimir-Kraft
- Lösung des Energieproblems?
 - ▶ unwahrscheinlich, Gegenstand der Forschung, Breakthrough Propulsion Physics Project NASA
- Alternative Interpretation des Casimir-Effektes
 - ▶ Casimir-Effekt auch ohne Vakuumfluktuationen beschreibbar

Zusammenfassung

Zusammenfassung

Casimir-Effekt:

Kraft zwischen ungeladenen Objekten

Zusammenfassung

Casimir-Effekt:

Kraft zwischen ungeladenen Objekten
erzeugt durch Vakuumfluktuationen

Zusammenfassung

Casimir-Effekt:

Kraft zwischen ungeladenen Objekten
erzeugt durch Vakuumfluktuationen
je nach Geometrie attraktiv oder repulsiv

Zusammenfassung

Casimir-Effekt:

Kraft zwischen ungeladenen Objekten
erzeugt durch Vakuumfluktuationen
je nach Geometrie attraktiv oder repulsiv

Experimente:

Bestätigung der theoretischen Vorhersagen

Zusammenfassung

Casimir-Effekt:

Kraft zwischen ungeladenen Objekten
erzeugt durch Vakuumfluktuationen
je nach Geometrie attraktiv oder repulsiv

Experimente:

Bestätigung der theoretischen Vorhersagen
Anwendung in MEMS

Zusammenfassung

Casimir-Effekt:

Kraft zwischen ungeladenen Objekten
erzeugt durch Vakuumfluktuationen
je nach Geometrie attraktiv oder repulsiv

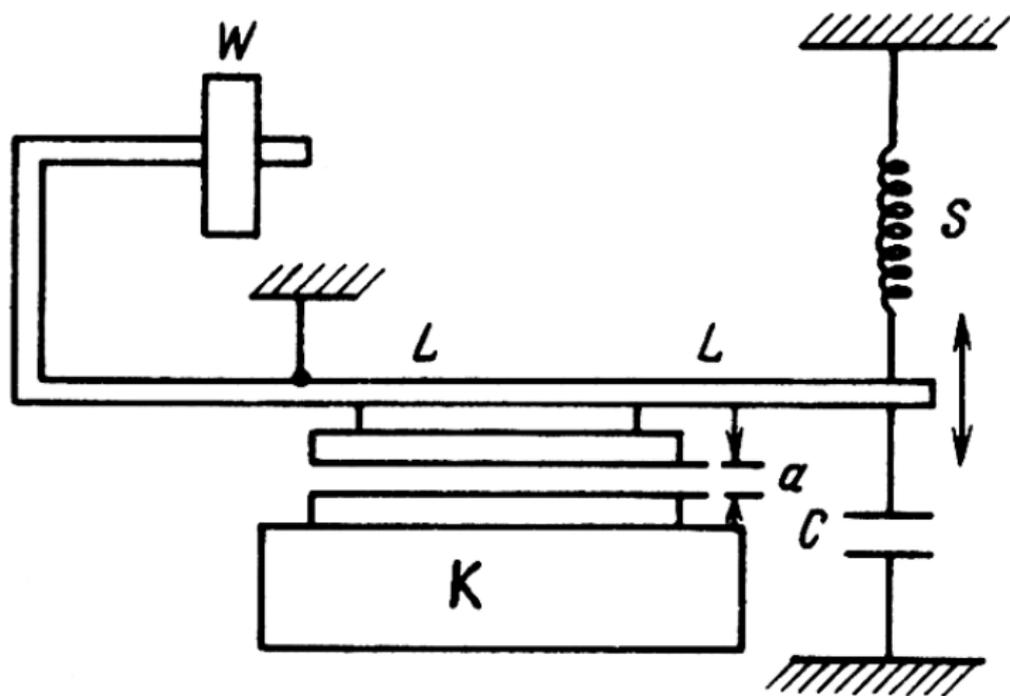
Experimente:

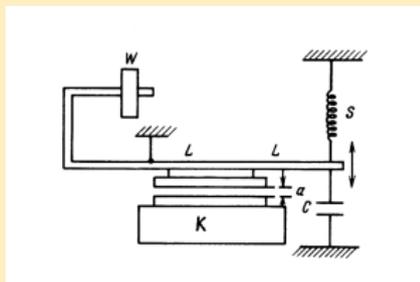
Bestätigung der theoretischen Vorhersagen
Anwendung in MEMS
Grundlagenforschung (neue fundamentale Kräfte)

Literaturangaben

-  A. Lambrecht, Phys. Unserer Zeit, 2005, 36(2), 85
-  H. G. B. Casimir, Kon. Ned. Akad. Wet., 1948, 51, 793.
-  M. Spaarnay, Physica 1958, 24, 751.
-  U. Mohideen, A. Roy, Phys. Rev. Lett. 1998, 81, 4549.
-  H. B. Chan et al., Science 2001, 291, 1941.
-  R. L. Jaffe, Phys. Rev. D 72, 021301(R) (2005)
-  Milonni P.W. The quantum vacuum: An introduction to QED (Academic Press, 1994)
-  V. M. Mostepanenko, N. N. Trunov, The Casimir Effect and its Applications (Oxford Academic Press, 1997)
-  K. A. Milton, Casimir Effect: Physical Manifestation of Zero-Point Energy (World Scientific, 2001)

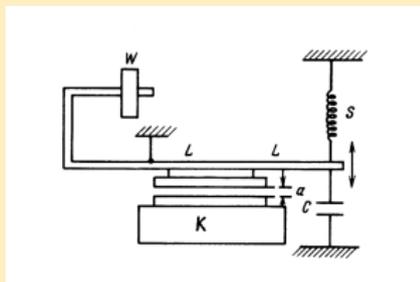
Ich bedanke mich für Eure Aufmerksamkeit.

Sparnaay (1958)¹

Sparnaay (1958)¹

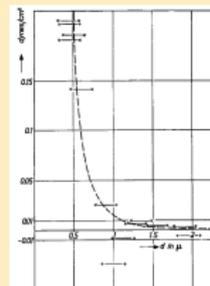
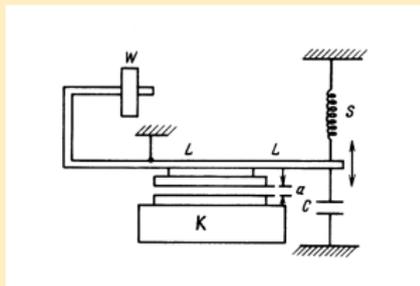
¹M. J. SPARNAAY, MEASUREMENTS OF ATTRACTIVE FORCES BETWEEN FLAT PLATES (1958),
Physica XXIV (751-764)

Sparnaay (1958)¹



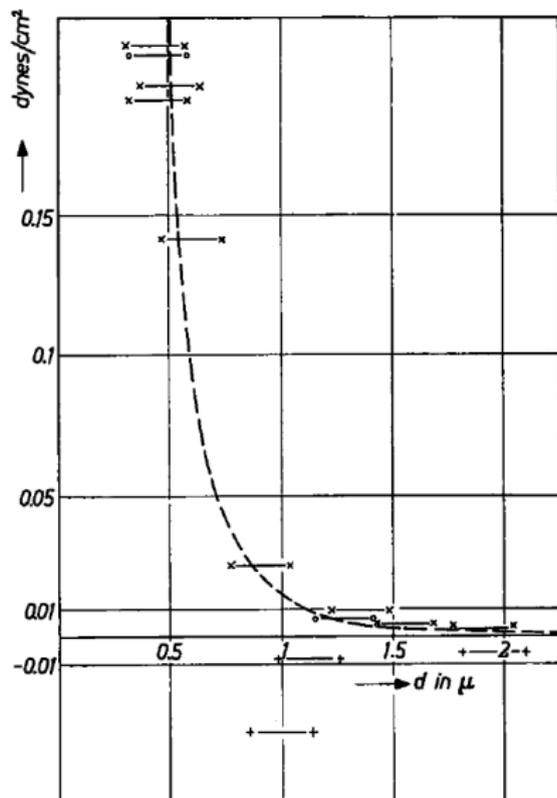
- Messgenauigkeit der anziehenden Kraft bei $10^{-9} N$

¹M. J. SPARNAAY, MEASUREMENTS OF ATTRACTIVE FORCES BETWEEN FLAT PLATES (1958), Physica XXIV (751-764)

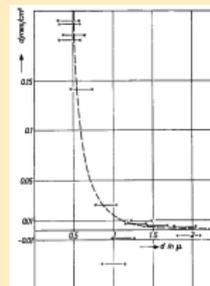
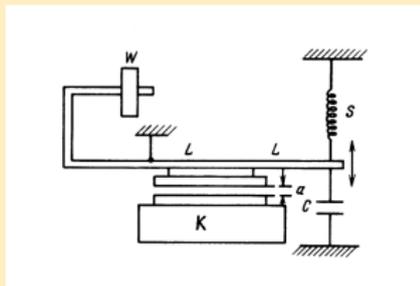
Sparnaay (1958)¹

- Messgenauigkeit der anziehenden Kraft bei $10^{-9} N$, aber Hysterese des mechanischen Hebewerks
- ⇒ große Ungenauigkeit der Messung des Abstandes d

¹M. J. SPARNAAY, MEASUREMENTS OF ATTRACTIVE FORCES BETWEEN FLAT PLATES (1958), Physica XXIV (751-764)

Sparnaay (1958)¹

Sparnaay (1958)¹



- Messgenauigkeit der anziehenden Kraft bei $10^{-9} N$, aber Hysterese des mechanischen Hebewerks
- ⇒ große Ungenauigkeit der Messung des Abstandes d

Schlussfolgerung von Sparnaay:

Experimentelle Resultate sind nicht im Widerspruch mit den theoretischen Vorhersagen von Casimir.

¹M. J. SPARNAAY, MEASUREMENTS OF ATTRACTIVE FORCES BETWEEN FLAT PLATES (1958), Physica XXIV (751-764)

Frederico Capasso (2001)

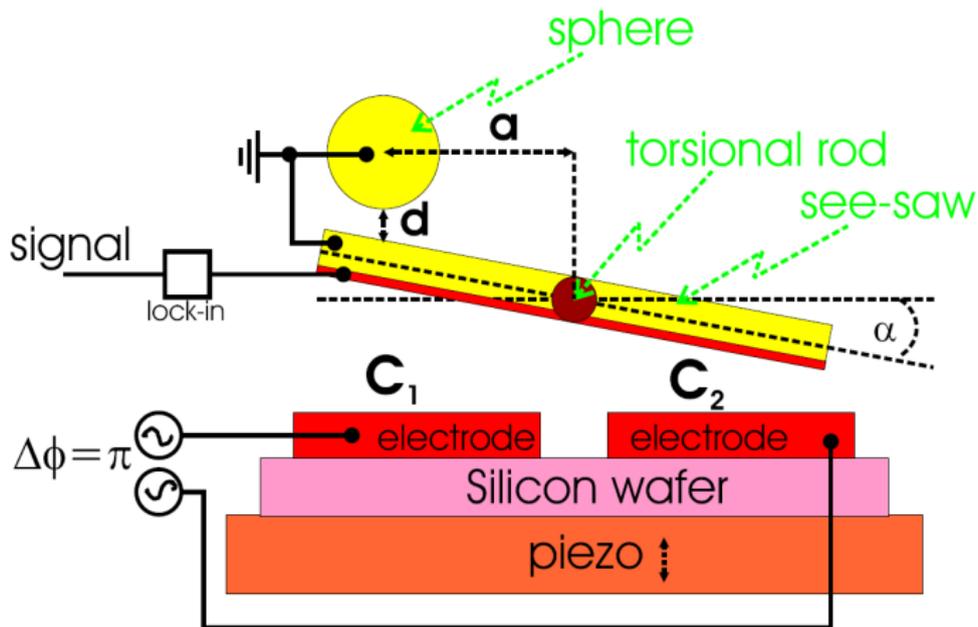


Abbildung: mikromechanischer Oszillator