

# Festligt fysikforsøg – Glasset drikker, lyset hæves

Af Michael Cramer Andersen og Svend E. Rugh, KVANT

Der findes mange festlige fysikforsøg, der kan udføres med simple hjælpemidler, og som kan inspirere til en diskussion om fysik. Vi modtager – meget gerne – eksempler på små festlige fysikforsøg, enten som løse idéer/beskrivelser (som vi skal redigere), helst med illustrationer, eller som forslag til færdige artikler (så vi ikke behøver at redigere).

## Indledning

Vi vil i KVANT meget gerne vise og diskutere nogle flere små *eksperimentelle forsøg*, der er lidt sjove og festlige. Derfor prøver vi, blandt andet, at starte denne lille spalte, hvor vi gerne vil inspirere vores læsere til at lege og eksperimentere med fysikken og diskutere fysiske effekter.

Vi vil (som nævnt i vort abstrakt) – meget stærkt – opfordre vores læsere til at indsende idéer til diverse små forsøg og bidrag til diskussion af løsninger (e-mail: kvant@kvant.dk). Det kan være egentlige *fysiske eksperimenter* men det kunne også være sjove *tankeeksperimenter* og paradokser (jf. fx spalten “Paradokser og opgaver” i det udmærkede tidsskrift GAMMA, udgivet af studerende på Niels Bohr Institutet gennem knap 40 år). Oplagte inspirationskilder kunne være bøger som fx Jearl Walker “The Flying Circus of Physics – With Answers” (John Wiley and Sons, 1975) [www.flyingcircusofphysics.com] eller Lewis Carroll Epstein and Paul G. Lewitt “Thinking Physics” (i mange udgaver) [se også fx www.conceptualphysics.com]. Inspirationskilder til de små eksperimentelle fysikforsøg kunne være bøger med titler som “Tricks og sjove forsøg”, “Sjov med væsker” eller fx “Sjove Fysikforsøg” af Francois Cherrier (Lademann, 1980). Nogle af os har haft glæde af en “Fysikkuffert” med diverse “*stand-up fysik*” (fra verdensfysikåret 2005, se fx www.testoteket.dk). Klaus Seiersen har på fysikbasen.dk mere end hundrede forskellige forsøg. Vi hører gerne om (nogle af) dem! Weekendavisen beskriver i det udmærkede tillæg “Faktisk” små sjove forsøg på en måde, der er til at forstå.

På Niels Bohr Institutet og H.C. Ørsted Institutet er der ligefrem en “Fysiklegestue”, som vi håber kunne have lyst til at skrive til Kvant, og berette om deres festlige små eksperimenter fra krypten (www.legestuen.nbi.dk). Tilsvarende aktiviteter findes på andre universiteter.

Vi håber således, at der gradvist vil kunne opbygges et slags eksempel-katalog med gode små eksperimenter og referencer til bøger og tidsskrifter, som kan være nyttige for læserne. “Politisk *ukorrekte* forsøg”, som fx en pølse, der sprænges i stykker, når den udsættes for høj spænding (220 eller 380 volt) (Se fx “Lysende saltgurk i elektrisk stol” i KVANT nr. 4 (december 2008)) – og den slags fysik “*i aktion*” – skal suppleres med nogle beskrivelser af relevante sikkerhedsforanstaltninger.

Forsøgene skal (helst) være simple at udføre, så også fummelfingrede teoretiske fysikere kan få dem til at virke. Men også gerne være lidt spektakulære, så fx eleverne motiveres. Altså den slags “hands on fysik”, “fysiklegestueforsøg” eller “køkkenbordsfysik”, som både kan overraske og lægge op til fysiske fænomener som man gerne selv – og sammen med nysgerrige venner og elever – vil prøve at forstå og måske får lyst til at regne lidt på.

## Glasset drikker – lyset hæves: Kan vi få et lys til at hæve sig uden at røre det?

“Dagens forsøg” er beskrevet i et tidligere nummer af KVANT (nr. 3, 2010) og det har også været beskrevet som et af flere “Bar-tricks” på Videnskab.dk, der desuden er citeret i et nummer af Weekendavisens tillæg “Faktisk” (22. okt. 2010).

Det er et lille forsøg, der er nemt at udføre, men – som vi skal se – ikke er helt så nemt at forklare. Der er adskillige forhold der bidrager til den fysiske effekt.



**Figur 1.** Til venstre: Tallerken med lidt vand og et tændt fyrfadslys samt et højt og slankt glas eller en glaskolbe. Til højre: Glasset placeres over lyset. Efter få øjeblikke slukker lyset og noget af vandet suges ind i glasset. Lyset kan hæves flere centimeter op fra tallerkenen. Med en buttet 2 liter glaskolbe er det nemt at få lyset til at hæve sig knap 10 centimeter (se senere).

**Sådan udføres forsøget:** Sæt fyrfadslyset på en tallerken. Hæld vand i tallerkenen så det når cirka en tredjedel op ad fyrfadslysets kant. Tænd lyset. Sæt det store glas ned over lyset. Lyset vil da – efter måske ca. 10 sekunder – først løftes, mens det brænder, og løftes yderligere, nok engang, efter at lyset slukkes (og luften afkøles).

## Forslag til løsning

Vi har i KVANT, til vor glæde, modtaget en del forskellige forslag, fra én nuværende og tre pensionerede lektorer på forskellige universiteter.

1) *Erik Both* (EB) er pensioneret lektor i fysik fra DTU, og vil være mange læsere bekendt som medforfatter til de udmærkede bøger *Spektrum I* og *II*. Han har med Henning Henriksen (som også er medforfatter til den sjove og meget interessante bog “Bogen om Grundstofferne”, der har et par siders opslag om hvert eneste grundstof) behandlet forsøget i et eksperiment for 8. klasse i bogserien KOSMOS [1]. Forfatterne fortæller, at forsøget stammer helt tilbage fra den engelske kemiker og læge John Mayow (1641-1679) som mente, at den mængde vand, der steg op i glasset, svarede til den mængde af luft, der nærede forbrændingen. Det var før den svensk/tyiske kemiker Carl Wilhelm Scheele (1742-1786) påviste luftarten oxygen.

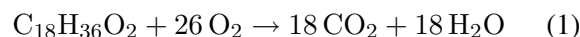
Som forklaring på forsøget skriver Henning Henriksen og Erik Both bl.a. (redigeret efter aftale med EB): Ved forbrændingen dannes  $\text{CO}_2$ , der erstatter en del af det oxygen, som bruges ved forbrændingen (jf. reaktionsligning (1)). Derfor vil rumfanget kun formindskes med ca. 6 %, og ikke ca. 21 % (alm. atmosfærisk luft indeholder ca. 21 %  $\text{O}_2$ ). Med et lille glas vil det nok blive mere end 6 % pga. den luft, der bobler ud i starten. Udføres forsøget i et stort glas, vil denne effekt formindskes. Lyset vil gå ud, inden det sidste oxygen er brugt op. Forsøget kan bruges til at erkende, at oxygen forsvinder ved forbrændingen og for at få en mere nøjagtig bestemmelse af luftens oxygenindhold, kan man lave et demonstrationsforsøg, hvor væsken er fortyndet natriumhydroxid. Carbondioxid er letopløselig i base, og man vil derfor se, at vandet stiger en del mere end de ca. 6 %.

EB henviser desuden til det første af en række “Bar-tricks” beskrevet på Videnskab.dk [2]. Han vurderer, at trykket hovedsagligt falder, fordi antallet af luftmolekyler bliver mindre, især fordi vanddampen, der dannes som restprodukt ved forbrændingen (se reaktionsligning (1) senere), kondenseres på indersiden af glasset.

2) *Jens Højgaard Jensen* (JHJ), lektor i fysik ved RUC – og bl.a. kendt fra KVANTs breddeopgaver, kommer i samme artikel [2] med forklaringen: “Luftrykket inde i glasset falder, mens luften uden for presser ned på vandet. Dermed bliver vandet skubbet ind i glasset, hvor trykket er mindre end i atmosfæren”. Han sammenligner vandsøjlen i glasset med et barometer. Han mener dog, at sagen er mere kompliceret, da luftrykket i glasset afhænger af både temperaturen og luftfugtigheden i glasset. Luftfugtigheden har betydning for, om vanddampen kondenserer, og dermed sænker luftrykket i glasset. Temperaturen i glasset har betydning for, hvor meget luften fylder.

3) *Lars Drud Nielsen* (LDN) er pensioneret lektor fra DTU, og har sendt en detaljeret støkiometrisk<sup>1</sup> beregning af forskellen mellem start- og sluttilstanden og negligerer i første omgang det dynamiske forløb imellem disse tilstande:

Vandet suges ind i glasset, fordi det indespærrede luftvolumen reduceres under forbrændingsprocessen. Stearinsyre<sup>2</sup> har formelen  $\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$ , dvs. bruttoformlen  $\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2$ . Forbrændingsprocessen bliver:



Den oprindelige atmosfære antages (i runde tal) at bestå af ca. 20 %  $\text{O}_2$  og ca. 80 %  $\text{N}_2$ . Fyrfadslyset antages at slukke, når der ikke er mere  $\text{O}_2$ . Luften inde i glasset består derefter af  $\text{N}_2$  i uændret mængde og  $\text{CO}_2$  fra forbrændingen af stearin eller paraffin. Forholdet mellem slutvolumen og begyndelsesvolumen bliver da:

$$\frac{V_{\text{slut}}}{V_{\text{start}}} \cong \frac{V_{\text{CO}_2} + V_{\text{N}_2}}{V_{\text{O}_2} + V_{\text{N}_2}} \quad (2)$$

Vanddamp ( $\text{H}_2\text{O}$ ) antages uden indflydelse. Partialtrykket af mættet vanddamp omkring stuetemperatur er kun 2-3 % – og vil i øvrigt påvirke både tæller og nævner. Med de 26  $\text{O}_2$  følger ca.  $4 \cdot 26 = 104 \text{ N}_2$ . Forholdet mellem slutvolumen og begyndelsesvolumen bliver da<sup>3</sup>:

$$\frac{V_{\text{slut}}}{V_{\text{start}}} = \frac{n_{\text{CO}_2} + n_{\text{N}_2}}{n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2}} = \frac{18 + 104}{26 + 104} = 94 \% \quad (3)$$

I et cylindrisk glas (hvor rumfang og højde er proportionale) stiger vandet altså ca. 6 % op. Hvis fyrfadslyset er lavet af paraffin (som ikke indeholder O og har bruttoformel mellem  $\text{C}_{18}\text{H}_{38}$  og  $\text{C}_{60}\text{H}_{122}$ ), bliver forholdet mellem slutvolumen og begyndelsesvolumen nærmere 93 %, så vandet kan stige næsten 7 % op i glasset.

Til beregningerne knytter der sig flere antagelser, hvoriblandt den væsentligste er antagelsen om, at lyset først går ud, når det allersidste iltmolekyle i glasset er brugt op. Der er yderligere antaget samme temperatur og tryk inden for og uden for glasset. Trykforskelle kan negligeres, så længe vandsøjlen er af størrelsesordenen cm og ikke meter. Temperaturforskelle udlignes efter kort tid og har kun indflydelse på overgangsforløbet.

LDN beskriver processen således: Det brændende lys vil, gennem varmetilførslen, bidrage til en udvidelse af den til enhver tid eksisterende gasblanding. Den termiske udvidelse og den gradvise støkiometriske reduktion af gasmængden ser under de praktiske omstændigheder ud til at holde hinanden nogenlunde i skak. Jeg har aldrig observeret, at den termiske udvidelse tager overhånd og medfører udslip af varm luft. Når lyset slukker, indstiller der sig ret hurtigt termisk ligevægt mellem luften i glasset og luften uden for. Derefter er der kun de støkiometriske konsekvenser tilbage – nemlig en volumenreduktion på ca. 6 %.

<sup>1</sup>En støkiometrisk beregning er en beregning af kvantitative sammenhænge mellem reaktanter og produkter i kemiske reaktioner.

<sup>2</sup>Stearinlys er typisk en blanding af stearinsyre med noget palmitinsyre eller også ren stearinsyre.

<sup>3</sup>For en ideal gas er rumfanget,  $V$ , proportional med stofmængden,  $n$ , ved fastholdt temperatur,  $T$ , og tryk,  $p$ .

LDN har opstillet en dynamisk model for overgangsforløbet, der består af et sæt koblede differentiaalligninger med fire parametre, som han har løst numerisk med passende valg af værdier. Med denne model kan han efterligne den opførsel, som iagttages i forsøget. Han opsummerer sine erfaringer med forsøg og model:

Den kemiske proces giver en gradvis og vedvarende volumenreduktion. Hvis man kun er interesseret i slutresultatet (ca. 6 % ved fuldstændig forbrænding), er der ikke mere at bekymre sig om. Opvarmningen giver en forbigående volumenforøgelse. De to bidrag skal adderes, og varmekapacitet og varmeafledning er afgørende for "transient"-forløbet (indsvingningsforløbet). Hvis der skulle opstå en netto volumenudvidelse i begyndelsen, kan der undslippe en mindre luftmængde, der resulterer i en større endelig volumenreduktion.

4) Carl-Erik Sølberg (CES) er tidligere lektor fra Aalborg Universitet og har sendt os en detaljeret beregning af trykændringen, hvor han antager at lysets opvarmning af luften er ansvarlig for hele effekten. Vi bemærker, at denne fysik er væsensforskellig fra den ovenfor nævnte. Argumentationen er følgende:

Når glasrøret er sat over flammen, stiger trykket pga. opvarmningen og luften bobler ud undervejs, så trykket hele tiden er i balance med atmosfæretrykket  $p_0 = \rho g L$ , hvor  $L = 10,3$  m er barometerstanden,  $\rho$  er vands massefylde og  $g$  er tyngdefeltets intensitet. Når forbrændingen nærmer sig sin afslutning er temperaturen højest,  $T_H$ . Voluminet er  $V_0 = A \cdot l$ , hvor  $A$  er rørets tværsnitsareal, og  $l$  er dets længde. Efter lyset er slukket, køles luften til stuetemperaturen  $T_0$ , vandstanden i røret stiger nu til  $h$ , og trykket i luften er  $p = p_0 - \rho g h$ . Voluminet er nu  $V = V_0 - Ah$ .

Luften betragtes som en ideal gas i begyndelsestilstanden:

$$p_0 V_0 = n R T_H \quad (4)$$

og ligeledes i sluttetilstanden:

$$(p_0 - \rho g h)(V_0 - Ah) = n R T_0 \quad (5)$$

Ved trivielle omformninger (hvor definitionerne for  $p_0$  og  $V_0$  indsættes i ligning (4) og (5) og  $n$ ,  $R$ ,  $\rho$ ,  $g$  og  $A$  elimineres) fås andengradsligningen:

$$\left(\frac{h}{l}\right)^2 - \left(\frac{L}{l} + 1\right) \left(\frac{h}{l}\right) + \frac{L}{l} \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right) = 0 \quad (6)$$

Vi tilnærmer: Med  $l = 0,5$  m bliver  $\frac{L}{l} \approx 20 \gg 1$ , og ligningen får de to løsninger:  $\frac{h}{l} \approx \frac{L}{l}$  og  $\frac{h}{l} \approx 1 - \frac{T_0}{T_H}$ , hvoraf kun den anden er brugbar.

CES 'gætter' på, at flammen opvarmer gassen til  $T_H = 800$  K og finder:  $\frac{h}{l} = \frac{5}{8} = 0,625$ . I forbrændingsprocessen er kvælstoffet passivt. Kun de 21 % ilt deltager og derfor multiplicerer vi med andelen af ilt i atmosfæren og får:  $\frac{h}{l} = \frac{5}{8} \cdot 0,21 = 0,13$ .

Begrundelsen for gassens højeste temperatur er følgende. Lysets massetab pr. tid kan sættes<sup>4</sup> til ca. 0,05 g/min. Benyttes en brændværdi for stearin på 46 kJ/g fås lysets effekt til:  $P = 38$  W. Med en brændetid på ca. 25 s fås en forbrændingsvarme  $Q_F = 950$  J, som afsættes til gas, glasvæg, paraffin og skål.

Hvis lyset har været tændt i lang tid inden forsøget starter vil der desuden være et par gram smeltet stearin, som optager en energimængde (størkningsvarmen):  $Q_S = 200$  J/g  $\cdot 2$  g = 400 J.

Med et slankt glas med  $l = 0,5$  m sætter vi (i runde tal) luftmængden i glasset til  $n = 1/25$  mol. Gassen (som antages at bestå af 2-atomige molekyler) har varmekapaciteten:  $C = n \frac{7}{2} R = \frac{1}{25} \text{ mol} \cdot \frac{7}{2} \cdot 8,31$  J/(mol·K) = 1,2 J/K. Hvis al varmen går til gassen bliver temperaturændringen  $\Delta T = \frac{950+400}{1,2} \text{ J/K} = 1125$  K.

Gassens temperatur stiger således fra ca. 300 K til ca. 1425 K. CES gætter på en fællestemperatur på ca. 800 K. Denne temperatur skal ses som et gennemsnit for hele gassen i glasset<sup>5</sup>.

Ved et konkret forsøg har CES målt rørets bruttolængde til 428 mm. Derfra skal trækkes vandstanden i røret i udgangstilstanden, 5 mm. Lyset fylder også noget. Dets korrigerede højde er:  $l_{\text{lyss}}^{\text{korrt}} = l_{\text{lys}} (d_{\text{lys}}/d_{\text{rør}})^2 = 5,1$  mm. Røret nettolængde er  $l = (428-5-5)$  mm = 418 mm, og beregningen viser, at vandet skulle stige 54 mm op i røret. Den målte værdi er  $(55 \pm 1)$  mm. Temperaturgættet var 'heldigt'. CES konkluderer: Min beregning og ikke mindst målingen viser, at vandet stiger ca. 13 % op.

## Diskussion

De to væsentligste effekter er:

1. EB+LDN observerer, at vandet stiger ca. 6 % op, pga. en ændret sammensætning af gasserne.
2. CES observerer, at vandet stiger ca. 13 % op, pga. at luften opvarmes og udvider sig og derefter afkøles og trækker sig sammen.

Der er højst sandsynligt tale om en kombination af begge effekter.

Derudover kan der være mindre bidrag af varierende størrelse: 1) Tilbageværende oxygenindhold ved afslutningen 2) Kondensation af vanddamp 3) Strømningsforholdene i det lukkede rum 4) Mængden af smeltet stearin der størkner (og optager varme fra gassen).

Vi har begge observeret bobler, der kommer ud *lige før lyset går ud* og sammenholdt med, at stigningen af vand tager til *efter* at lyset er slukket, så er trykændringerne af betydning og, efter al sandsynlighed, en konsekvens af temperaturændringer.

Konklusionen er, foreløbig, at vandet (lyset) kan hæves 6-13 % af rumfanget afhængig af omstændighederne. En nærmere analyse skulle fx involvere en eksperimentel bestemmelse af lysets effekt og massetab, luftfugtigheden, iltindholdet ved afslutningen, geometrien

<sup>4</sup>Denne størrelse kan bestemmes groft ved at dividere massen af et fyrfadsllys (20 g) med brændtiden (6 timer), eller med en præcisionsvægt.

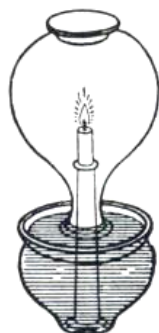
<sup>5</sup>Luftens temperatur er højest meget tæt på flammen og aftager meget kraftigt med afstanden fra lyset til ca. stuetemperatur ved glasvæggen.

af opstillingen og strømningsforholdene i det lukkede rum. Denne udfordring kunne måske være emnet for et studieretningsprojekt i 3.g, eller et studenterprojekt på universitetet? Vi håber med denne artikel at have aflivet nogle myter om at der er en meget enkel forklaring.

### En historisk note

Luft er et af de fire oldgræske elementer. Men også i andre gamle kulturer blev luft, hvor man bemærkede dens eksistens, betragtet som ét element. Leonardo da Vinci (1452-1519) citeres for at være den første europæer, som gav udtryk for tvivl på, at atmosfærisk luft er ét element. Han bemærkede, at luft forsvinder – men ikke fuldstændigt – hvor dyr ånder, eller forbrændinger foregår, og han beskrev sammenhængden: “Hvor en flamme ikke kan leve, kan intet dyr, der ånder, leve” [4].

Vi har sporet en variant af forsøget helt tilbage til den antikke ingeniør Philon fra Byzans (280-220 fvt.), der beskrev et forsøg som vist på figuren nedenfor. Eksperimentet skulle illustrere, at der ikke findes “kontinueret vakuum”<sup>6</sup>.



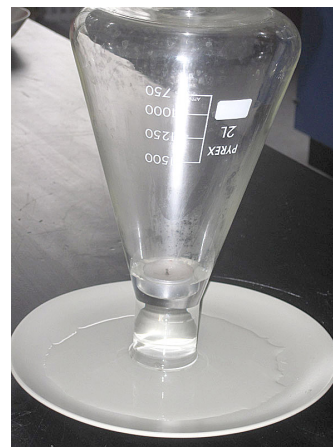
**Figur 2.** Eksperiment med et lys der brænder i et glas beskrevet af den antikke ingeniør Philon fra Byzans (280-220 fvt.). Forsøget er refereret af Heron fra Alexandria (10-70 evt.) i hans værk “Pneumatikken” (fx, engelsk udgave, 1899), hvor tegningen er taget fra.

### Hvor højt vil lyset – maksimalt – kunne hæves?

Med en 2 liters buttet glaskolbe (med en slank hals hvor lyset kan løftes indeni) er det nemt at få lyset hævet op til knap 10 centimeters højde. Men hvor højt vil lyset egentlig kunne hæves – her tænkt som et tankeeksperiment eller et fysisk eksperiment udført i praksis?

Hvis man kunne få trykket ned på nul, inden i glaskolben, ville en vandsøjle, som bekendt, kunne blive ca. 10 meter (1000 cm) høj. Hvis trykket kun kan nå ned på 0,94 atm, er en øvre grænse måske ca. 60 cm? Vi kunne tænke os et slags Storm P. agtigt forsøg med et mindst 60 cm højt glasrør, som ikke er meget tykkere end stearinlyset, der leder op til en stor buttet glaskolbe med luft (måske flere kubikmeter luft), altsammen holdt oppe (i vor stadige kamp mod tyngdekraften) af diverse Storm P. agtige anordninger. I en sådan opstilling spekulerer vi på om vandet, og stearinlyset, inde i det tynde

rør måske kan stige ca. 60 cm op? Hvis en eller flere læsere sender velkvalificerede, og velformulerede, bud på dette spørgsmål – bringer vi det gerne i denne spalte.



**Figur 3.** Vandet løfter stearinlyset ca. 8 centimeter op i den buttet (konisk) 2 liter glaskolbe (som jo forefindes i ethvert kemilokale)

En pointe ved et forsøg som dette er, at det kan forberedes på fem minutter; det overrasker de fleste når de ser det første gang, og det giver anledning til gode diskussioner om tryk, temperatur, forbrænding, luftens sammensætning og mange andre emner. I forbindelse med undervisning i fysik og kemi i gymnasiet kan det virke motiverende ved gennemgang af fx idealgasligningen. Der skal nogle beregninger til for at kvalificere diskussionen af hvad der sker. På denne måde kan man lege sig lidt til noget grundlæggende fysik. Man kunne fx lade eleverne udføre forsøget parvis og bede dem diskutere hvad der sker (eventuelt ud fra nogle arbejdsspørgsmål).

Vi takker for ovennævnte bidrag til diskussioner af “dagens forsøg”, og vi vil også gerne takke Jannik Lundgaard Rasmussen for mange diskussioner om dette og andre fysikeksperimenter. Tak til Karin Tybjerg for uddybning af Philons eksperiment. Til sidst en tak til Johanne de Leon, der for en del år tilbage viste os dette lille forsøg. Ved en superfestlig lejlighed.

### Litteratur

- [1] Erik Both, Henning Henriksen: KOSMOS, Læreresource B, side 217. Gyldendal 2009.
- [2] Jonas Salomonsen, Få glasset til at drikke, Videnskab.dk den 5. februar 2010, <http://www.videnskab.dk/content/dk/temaer/bar-tricks>
- [3] Fysikbasen, forsøg nr. 69, Tændstik 'opsuger' vand, <http://www.fysikbasen.dk/index.php?id=69page=Vis>
- [4] E. Rancke-Madsen (1984), Grundstoffernes opdagelseshistorie, Gads Forlag, s. 46.
- [5] Der findes flere film der demonstrerer forsøget, fx: [http://www.metacafe.com/watch/1698720/-water\\_sucked\\_into\\_a\\_bottle\\_how/](http://www.metacafe.com/watch/1698720/-water_sucked_into_a_bottle_how/)

<sup>6</sup>Videnskabshistoriker Karin Tybjerg fortæller: “Flere af de antikke tænkere mente at man kunne have små mini-vakua mellem partikler eller atomer. Spørgsmålet er så om partiklerne kan trækkes fra hinanden så der dannes et kontinuert vakuum. Diskussionerne er meget komplicerede: Er et vakuum tomt rum eller er der heller ikke rum?”