

Prof. Dr. Erik Jacobson

Überarbeiteter Vortrag,
gehalten vor der Mitarbeiterversammlung
des Fachbereichs 1 „Einheiten und Formelzeichen“ (AEF)
des Normenausschusses 152 „Technische Grundlagen“ (NATG)
im Deutschen Institut für Normung (DIN)
am 5. April 2006 in Freudenstadt

Wie leer ist das Vakuum¹

oder

~~Die Eigenschaften vom Nichts~~^{2,3,i}

Volkswisheiten

¹ Lieber ein Vakuum im Kopf als gar nichts drin

² Ist der Hund auch noch so dumm frisst er doch kein Vakuum

³ Das Vakuum ist schnell verdünnt, wenn es ins leer Zimmer rinnt

Inhalt

1	Vorwort	3
2	Antike	4
3	Nach dem (finsternen) Mittelalter	5
3.1	Die Konservativen.....	5
3.2	Die Progressiven	5
3.3	Technische Spielereien.....	5
3.4	Wissenschaftliche Erkenntnisse	6
4	Technisches Vakuum	7
4.1	Vakuumbereiche	7
4.2	Vakuummessung	7
4.3	Vakuumpumpen	7
4.4	Weltraumleere	10
4.5	1. Definition	10
5	Das warme Vakuum.....	11
5.1	Gedankenexperiment.....	11
5.2	Energie-Inhalt.....	11
5.3	2. Definition	11
6	Der Äther	12
6.1	Die Messung der (endlichen) Lichtgeschwindigkeit.....	12
6.2	Das Wesen des Äthers.....	13
6.3	Erste Zweifel	13
6.4	Die Widerlegung des Äthers	14
6.5	Eine letzte Rechtfertigung.....	14
7	Die Leere im Mikrokosmos	15
7.1	Gase.....	15
7.2	Festkörper.....	15
8	Das moderne Vakuum	16
8.1	Die Nullpunktsstrahlung	16
8.2	Casimir-Effekt.....	17
8.3	Die Vakuumfluktuation.....	17
8.4	Vakuumpolarisation	17
9	Das Kosmische Vakuum	18
9.1	Der Urknall.....	18
9.2	Die Kosmische Expansion	18
9.3	Hintergrundstrahlung	18
9.4	Das Ende der Welt	19
10	Die Quintessenz	20
10.1	Materie	20
10.2	Strahlung	20
10.3	Die Quintessenz	20
10.4	Die Bestandteile vom Nichts.....	20
10.5	Resumee	20
11	Die Materialeigenschaften des Vakuums	21
11.1	Naturkonstanten	21
11.2	Abgeleitete Größen	21

1 Vorwort

Der Gedanke, etwas über das Vakuum zu erzählen, kam mir schon vor geraumer Zeit, denn immer wieder tauchen Begriffe in unserer Arbeit auf, die hierauf Bezug nehmen, so

- die Vakuumlichtgeschwindigkeit c_0
- die Vakuumpermeabilität μ_0
- die Vakuumpermittivität ϵ_0
- der Vakuumwellenwiderstand Z_0

Nachdem ich mich schon während des Studiums mit Vakuumanlagen aus Glas und in der jüngeren Vergangenheit an der FH in Frankfurt mit der Entwicklung von Vakuumpumpen befasst hatte, wollte ich mich mit der Theorie dazu auf den neuesten Stand bringen.

Nach dem anregenden Vortrag von Oberschelp im März 2002 zur Frage „Wie rund ist die Erde“ hatte ich die Idee eine ähnliche Frage als Titel voranzustellen: „Wie leer ist das Vakuum?“

Nach einigen Nachforschungen kam ich zur Erkenntnis, dass diese Frage heute recht kurz und unbefriedigend beantwortet werden kann: „Man weiß es nicht so ganz genau!“

Daher habe ich auch den Untertitel „Die Eigenschaften vom Nichts“ wieder gestrichen, um nicht vorschnell Hoffnungen zu erwecken.

Die Forschungen sind derzeit so sehr im Fluss, dass eine verlässliche Antwort nicht gegeben werden kann. Alles ist derzeit im Fluss – panta rhei. $\pi\alpha\nu\tau\alpha\ \rho\epsilon\iota$

So habe ich mich entschlossen, die Frage etwas mehr aus historischer Sicht anzugehen, was auch die Probleme klarer macht und die Möglichkeiten aufzeigt, zukünftige Entwicklungen einzuschätzen.

Fangen wir also bei den alten Griechen an.

2 Antike

Schon die alten Griechen

waren sich uneins, zwei Schulen kennzeichnen die antiken Vorstellungenⁱⁱ

1. Die Atomisten

Leukipp (5. Jahrh. v. Chr., Lehrer von Demokrit) denkt sich:

die Welt besteht aus leerem Raum und Materie; dies ist denknotwendig, da sich die Materie ohne den leeren Raum niemals bewegen könnte.

Demokrit (~460 – 371 v. Chr.) postuliert verschiedenartige Atome, welche die Materie ausmachen und Leere (το κενον) zwischen ihnen. Daraus folge auch die Unendlichkeit des Kosmos.

2. Die Pythagoräer

Pythagoras (~570 - 480 v. Chr.) beschäftigt sich mit Mathematik, Mystik und Musik: „Die Zahl ist die Natur und das Wesen der Dinge“

Empedokles (~495 – 435 v. Chr.) „erfindet“ die 4 Elemente:

- Feuer, Erde, Luft, Wasser.

Platon (427-347 v. Chr.) ordnet die 4 Elemente den Regulären Körpern zu

- Tetraeder(4), Hexaeder(6), Oktaeder(8), Ikosaeder(12).

Aus ihnen können die verschiedensten Atome gebildet werden.

Der 5. Platonische Körper, der Dodekaeder(20), wird dem Kosmos zugeordnet, dessen Substanz als der 5. Stoff (πενταυσια), lateinisch als **Quintessenz** bezeichnet wird.

Aristoteles (384-322 v. Chr.) verfeinert die Theorie der 4 Elemente von Empedokles und verdammt die Lehre (und die Leere) des Demokrit als absurd.

Er „erfindet“ die **Peripatetische Dynamik**:

sie fordert die unmittelbare Wirkung der Kraft auf die Körper

aufeinander, d.h. es gibt keine Fernwirkung (keine Kraftfelder), daraus ergibt sich:

$$\text{Geschwindigkeit} = \text{Wirkende Kraft} / \text{Widerstand}$$

In der Leere berühren sich die Körper nicht, es kann keine Kraft wirken, die Körper wären orientierungslos, der Widerstand wäre null.

Im Vakuum wäre dann jede Geschwindigkeit unendlich, und dies für alle Zeiten (Inertialgesetz).

Daraus entsteht die Lehre vom **Horror Vacui**:

Ein Vakuum (lat. vacuus = leer) ist ein unnatürlicher Zustand und würde eine Wiederherstellung der Ordnung erfordern. Das fürchtet die Natur und versucht dies zu vermeiden.

Der Kosmos ist endlich, begrenzt durch die Himmelsphären, bestehend aus der Quintessenz.

- Das Aristotelische Weltbild ist in sich geschlossen und lässt keine Änderungen zu.

- Folge ist das finstere Mittelalter

Archimedes (285 – 212 v. Chr.) lehnt die Pythagoreische Zahlenmystik ab und treibt Experimentalphysik (ohne Spekulationen).

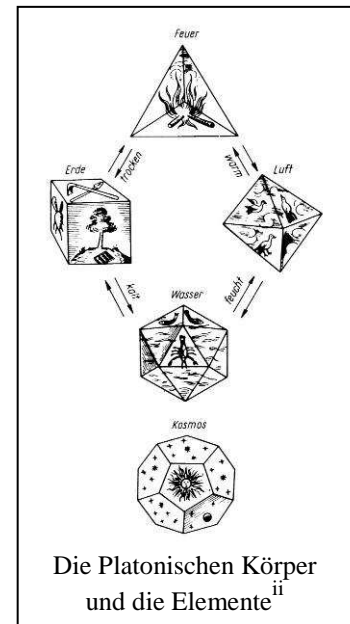
„Gebt mir einen Punkt, an dem ich stehen kann, und ich will die Erde aus den Angeln hebe(l)n“.

(Was mag er wohl im Vakuum des Weltraums gemacht haben ?)

Er erfindet

- die Druckpumpe
- die Feuerspritze
- den Stech- und den Winkelheber, die letztlich auf Vakuumeffekten beruhen

Dann ist eine Weile Funkstille.



3 Nach dem (finsternen) Mittelalter

3.1 Die Konservativen

Descartes (Cartesius) (1596 – 1650): Das kartesianische Weltbild soll das aristotelische ersetzen. Es bleiben der Horror Vacui und die unmittelbare Kraftwirkung.

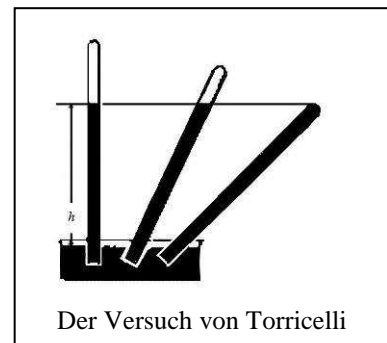
Galilei (1638): Führt Messungen des Horror Vacui durch Gewicht an wassergefüllten Zylinderstopfen durch. Daraus schließt er: die Festigkeit der Körper beruht auf dem Horror Vacui.

3.2 Die Progressiven

Beekmann (1618) stellt fest dass Wasserpumpen (Saugpumpen) nur bis zu einer bestimmten Tiefe (18 Ellen = 10 m) arbeiten. Wir wissen inzwischen, dass die Luft das Wasser nur bis zu dieser Höhe drücken kann!

Torricelli (1643) führt seinen berühmten Quecksilbersversuch durch: unabhängig von der Neigung des zu Beginn vollständig mit Quecksilber gefüllten Rohres steigt das Quecksilber nur bis zu einer Höhe $h = 0,760$ m. Darüber bildet sich ein leerer Raum aus. Diese Höhe der Quecksilbersäule entspricht wegen der höheren spezifischen Dichte den 18 Ellen Wassersäule, die Beekmann feststellte.

Diese Höhe schwankt je nach Wetterlage um einige Millimeter. Daraus entwickelt sich das Quecksilberbarometer.

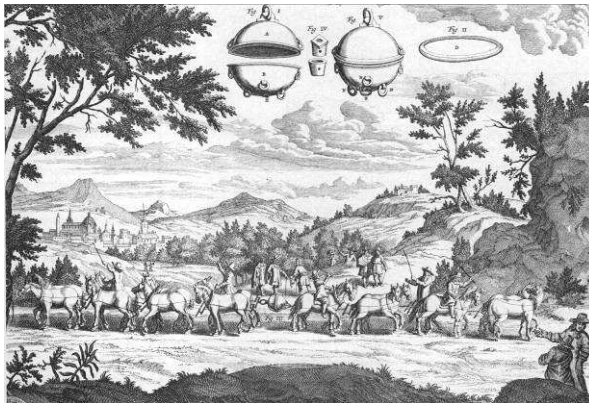


Der Versuch von Torricelli

Pascal (1648): misst Luftdruckunterschiede in verschiedenen Höhen am Puy-de-Dôme, daraus entwickelt sich der barometrische Höhenmesser.

Er weist die Torricellischen Leere, das Vakuum als Effekt des Luftdrucks nach.

3.3 Technische Spielereien



Otto von Guericke (1654), Bürgermeister von Magdeburg, demonstriert wie 2 evakuierte Halbkugeln auch durch die Kraft von 20 Pferden, je 10 auf einer Seite, nicht getrennt werden können. Eine Wand und 10 Pferde hätten genügt, die gewählte Anordnung ist jedoch viel spektakulärer. Das Bild zeigt eine Vorführung in Regensburg [Boy]



Die Gebrüder Joseph Michel und Jacques Étienne Mongolfier konstruieren einen Heißluftballon (1782), der durch den Auftrieb der thermisch verdünnten Luft aufsteigt [Wikⁱⁱⁱ]

Diese Spektakel erwecken das Interesse der Öffentlichkeit und bewirken eine Beschleunigung wissenschaftlicher Untersuchungen.

3.4 Wissenschaftliche Erkenntnisse

Boyle und Mariotte (1664, 1676) finden die ersten Gasgesetze:

$$p \cdot V = \text{const bei } T = \text{const}$$

Gay-Lussac (1802) findet die Abhängigkeiten von der (absoluten) Temperatur T .
Daraus ergibt sich die Allgemeine Gasgleichung:

$$pV = mR_s T = Nk_B T$$

darin ist

p = Druck V = Volumen T = Temperatur

m = Masse R_s = spezifische Gaskonstante

N = Teilchenzahl k_B = Boltzmannkonstante

Diese Gleichung ist nur für ideale Gase gültig, also für solche, deren Teilchen, Atome oder Moleküle, einen genügend großen Abstand von einander haben.

Für reale Gase findet J.D van der Waals (um 1900) eine Modifikation, welche auch die Kondensation und Erstarrung von Gasen recht einfach beschreibt. Darin gehen das Eigenvolumen der Teilchen und deren gegenseitigen Wechselwirkungen ein.

4 Technisches Vakuum

4.1 Vakuumbereiche

Vakuumbereich	Druck / mbar ⁺	Dichte / (kg/m ³)	freie Weglänge / m	Zusammensetzung
Großvakuum	1 bis 1000	1 bis 10 ⁻³	10 ⁻⁴ bis 10 ⁻⁷	Luft (N ₂ , O ₂ , H ₂ ..)
Fein-, Vorvakuum	10 ⁻³ bis 1	10 ⁻⁶ bis 10 ⁻³	10 ⁻¹ bis 10 ⁻⁴	Luft (N ₂ , O ₂ , H ₂ ..)
Hochvakuum	10 ⁻⁷ bis 10 ⁻³	10 ⁻¹⁰ bis 10 ⁻⁶	10 ⁺³ bis 10 ⁻¹	org. Restgase
Ultrahochvakuum	< 10 ⁻⁷	< 10 ⁻¹⁰	> 10 ⁺³ (1 km)	org. Restgas, H ₂ , He
Produktion	> 10 ⁻¹⁰	> 10 ⁻¹³	< 10 ⁺⁶ (1000 km)	org. Restgas, H ₂ , He
Labor	< 10 ⁻¹³ (2)	< 10 ⁻¹⁶ (1)	> 10 ⁺⁹ (1 Million km)	(H ₂ ,) He

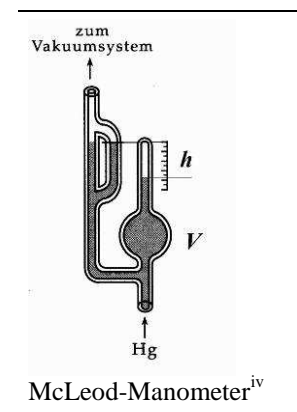
(+) 1 mbar = 1 hPa

(1): 100 Protonen /mm³ = 10¹¹ Protonen/m³

(2): Endvakuum verbessert sich um ca. 1 Zehnerpotenz pro Jahrzehnt

4.2 Vakuummessung

Methode	Grenzdruck in mbar
Volumenmessung (McLeod): Kompression eines bekannten Volumens; gasartunabhängig	10 ⁻⁹
Wärmeableitung (Widerstandsmessung); gasartabhängig	10 ⁻⁸
Ionisationsmanometer: Ionisation des Restgases durch Elektronen und Messung des Ionenstroms; gasartabhängig	10 ⁻¹²



4.3 Vakuumpumpen

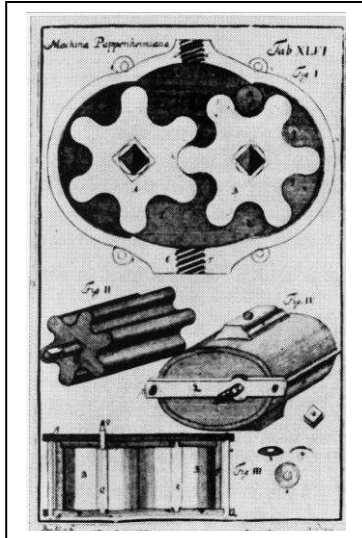
Eine Übersicht

Pumpentyp	Vakuumbereich	Merkmale
Mechanische Pumpen		Dauerbetrieb
Verdrängerpumpen:		
Kolben-, Rotoren- oder Schieberpumpe	Vorvakuum	robust
Zahnrad-, Membran-, Kreiselpumpe	Vorvakuum	robust
Turbomolekularpumpe	Ultrahochvakuum	empfindlich, n>60000/min
Treibmittel(diffusions)Pumpen		
Wasserstrahlpumpe	Großvakuum	sehr robust
Quecksilber	Hochvakuum	Gesundheitsgefahr
Öldiffusionspumpe	Ultrahochvakuum	Brandgefahr
Sorptionspumpen		Chargenbetrieb
Absorption: Zeolithe bzw. Aktivkohle. Zirkon-, Titanschwamm	Ultrahochvakuum	Nur für geringe Mengen z.B. in Elektronenröhren
Adsorption: Getterpumpen (Bariumspiegel, Ionengetterpumpen)	Ultrahochvakuum	In Elektronenröhren in Aufdampfanlagen
Kondensation: Kryopumpe (bis ca 4K)	Ultrahochvakuum	vielseitig

4.3.1 Verdrängerpumpen

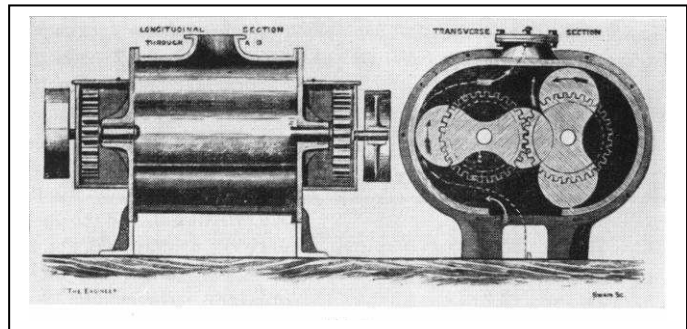
Historische Pumpen

4.3.1.1 Machina Pappenheimiana



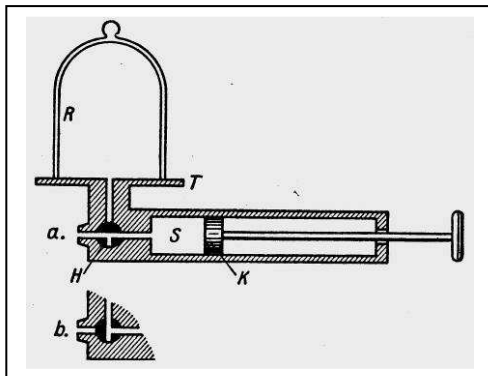
Um 1630
zwei 6-zahnige Drehkolben.
Förderleistung nicht bekannt.^v

4.3.1.2 Rootspumpe



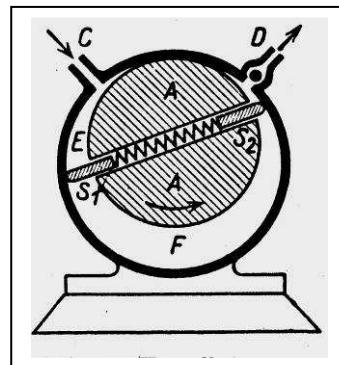
Um 1848
zwei 2-zahnige 8-förmige Drehkolben (Wälzkolben),
Förderleistung: 17 000 m³/h bei Normaldruck^{vi}

4.3.1.3 Kolbenschieberpumpe



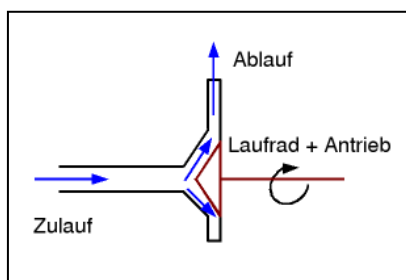
Otto von Guericke 17. Jahrhundert,
Prinzip der Fahrradluftpumpe (Ottomotor)^{vii}

4.3.1.4 Drehschieberpumpe



Kapselluftpumpe (Wankelmotor)^{vii}

4.3.1.5 Kreiselpumpe zur Vorvakuumerzeugung^{viii}



4.3.1.6 Turbomolekularpumpe^{ix}

Zentrifugalpumpe mit hoher Drehzahl, $n > 60\,000$ U/min
Randgeschwindigkeit $v > 1000$ m/s
Endvakuum $p < 10^{-10}$ mbar

- Zum Vergleich:
Thermische Geschwindigkeiten bei Zimmertemperatur:
 $v(\text{H}_2) = 1110$ m/s,
 $v(\text{He}) = 785$ m/s

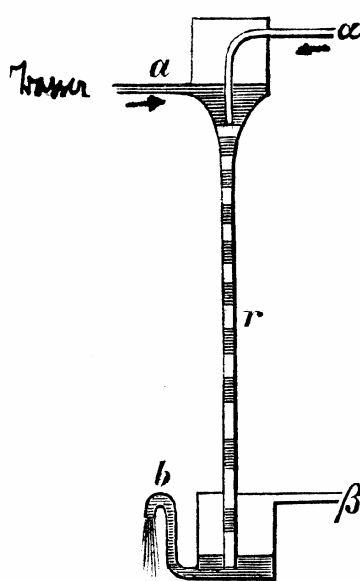


4.3.2 Treibmittelpumpen

4.3.2.1 Quecksilberballastpumpe^x

Ausnutzung der Torricellischen Leere,

Restgasdruck des Hg $\approx 1,2 \cdot 10^{-3}$ Torr (mmHg) $\approx 1,6 \cdot 10^{-3}$ mbar



Das Wassertrommelgebläse besteht aus zwei luftdicht geschlossenen, durch ein möglichst langes vertikales Rohr r miteinander verbundenen Blechgefäßen. In das obere tritt aus einer Wasserleitung durch a Wasser, gleichzeitig durch α Luft, welche, durch das fallende Wasser mit fortgerissen, mit demselben in das untere Gefäß gelangt, von wo das Wasser durch b abläuft, die Luft durch β . Das Gebläse saugt also Luft durch α und bläst durch β . Ähnlich wirkt die ganz aus Glas hergestellte Wasserluftpumpe von Bunsen. (1868.) Die Quecksilberluftpumpe von Sprengel (1865) ist ein lotrechtes Glasrohr, das oben einen Trichter trägt, unten unter Quecksilber taucht. Füllt man den Trichter mit Quecksilber, so fällt dieses durch das Rohr, ebenfalls leere Räume bildend. Kurz unter der Trichteröffnung mündet ein von einem Rezipienten herkommendes Seitenrohr in das lotrechte Rohr. Die leeren Räume nehmen daher die vom Rezipienten herkommende Luft in sich auf und entleeren denselben. Die Wasserluftpumpe wird besonders zum Filtrieren unter erhöhtem Drucke, die Sprengelsche Quecksilberluftpumpe zum Entleeren kleiner Räume (wie andere Quecksilberluftpumpen 118) gebraucht.

4.3.2.2 Wasserstrahlpumpen^{xi}

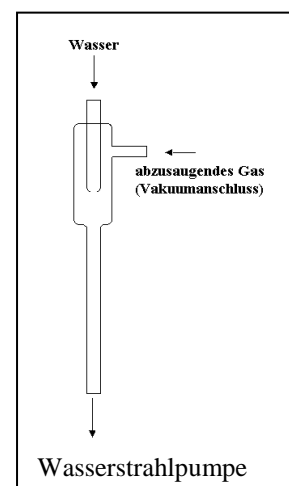
Das strömende Wasser erzeugt nach dem Strömungsgesetz von Bernoulli einen Unterdruck, der das Gas absaugt. Übrig bleibt stets der Restgasdruck des Wassers (bei Zimmertemperatur ca. 18 mmHg = 23,4 mbar).

4.3.2.3 Diffusionspumpen

Diffusionspumpen benutzen statt einer Flüssigkeitsstahls einen Dampfstrahl; sie benötigen ein Vorvakuum ($p < 10^{-2}$ mbar)

- Wasserdampf (Boosterpumpe), Restgasdruck = 23,4 mbar
- Quecksilberdampf, Restgasdruck = $1,6 \cdot 10^{-3}$ mbar
- Öldampf, Restgasdruck $< 10^{-9}$ mbar

Die Restgase können mit nachgeschalteten Kondensatoren, Kühlfallen mit flüssigem Stickstoff, bei -150°C (77K) ausgefroren werden.



4.3.3 Kondensationspumpen

4.3.3.1 Kühlfallen

Kondensation von Gase an Kühlflächen

bei $T \sim 77$ K, der Temperatur von siedendem flüssigem Stickstoff

4.3.3.2 Kryopumpen

Wärmepumpe mit Stirling-Kreisprozess, Helium als Arbeitsgas

Kondensation aller Gase (außer He) bei $T \approx 4$ K,

Endvakuum $p < 10^{-13}$ mbar

Hohe Saugleistung, Regeneration erforderlich.

4.3.4 Sorptionspumpen

Arbeiten im Chargenbetrieb, müssen vor Gebrauch durch Erhitzen entgast werden.

Zur Beseitigung von Restgasen bei Drucken unter 10^{-10} mbar.

4.3.4.1 Absorptionspumpen

Zeolithe, Aktivkohle (Nusskohle),

Zirkon-, Titan-Schwamm insbesondere in Fernsehrohren

4.3.4.2 Getterpumpen

Durch Verdampfen von Metall, das sich samt dem Restgas an der Wand niederschlägt.

Z.B. Bariumspiegel in Elektronenrohren

4.3.4.3 Ionengetterpumpen

In einer Gasentladung wird das Restgas ionisiert und mit hoher Geschwindigkeit in die Wand „geschossen“.

4.4 Weltraumleere

Welchen Restgasdruck erreicht man im Weltraum?

Barometrische Höhenformel $p = p_0 \exp(-h/h_0)$ mit $h_0 = 7962$ m (ohne Temperatenausgleich)

Höhe h in km	Druck (in bar) und Dichte (in kg/m)	Temperatur
0	1	+20°C
10 (Flugzeuge)	0,3 bzw. 0,264 (2)	-50°C = 223°K
100 (Satelliten)	$3,7 \cdot 10^{-6}$	
380 (ISS)	$2,35 \cdot 10^{-21} = 1,5 (+5)$ Protonen/cm ³ (1)	+10 ⁶ K
1000 (Satelliten)	$5 \cdot 10^{-55}$	
35785 (geostat.)	$2,2 \cdot 10^{-1943}$	

(1) Hier beginnt schon der Einfluss des Sonnenwinds, der in Erdnähe mit ca. 5 Protonen/cm³ und 450 km/s bläst (73% H⁺, 21% He⁺, 4% He⁺⁺)

(2) Mit Temperatenausgleich (gültig bis 11 km Höhe): $p = p_0 \cdot (1 - h/44240\text{m})^{5,255}$

4.5 1. Definition

**Vakuum :=
Raumgebiet, das keine Materie enthält**

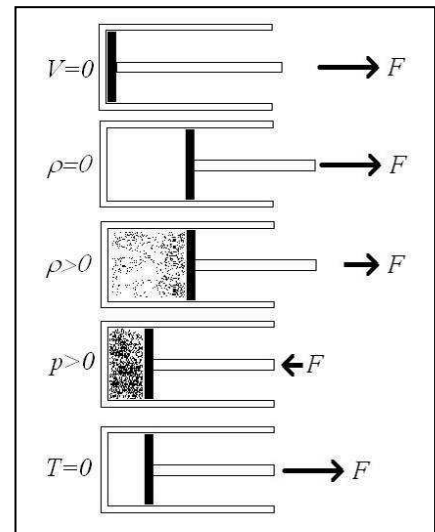
5 Das warme Vakuum

5.1 Gedankenexperiment

Adiabatische Expansion von $V = 0$ erzeugt ein Vakuum (1),
 dieses füllt sich mit Strahlung,
 mit thermischem Rauschen von Oszillatoren in den Wänden,
 der (schwarzen) Hohlraumstrahlung,
 mit Photonen unterschiedlicher Frequenz bzw. Energie ($E=hf$)
 in Abhängigkeit von der thermischen Energie ($E= 3/2 N kT$)
 mit der spektralen Energieverteilung

(Planck 1900):^{xii}
$$S(\nu) = \frac{2h\nu^3}{c_0^2} (e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1)^{-1}$$

Das Maximum dieser Verteilung liegt bei $\lambda_{\max} = c_0/\nu = \text{const}/T$
 (Wien'sches Verschiebungsgesetz, ca. 1894) mit
 $\text{const} = hc_0/(4,965k) = 2,898 \text{ K mm}$



5.2 Energie-Inhalt

Strahlungsdichte^{xiii}
$$S = \frac{2\pi^5}{15} \frac{k^4}{c_0^2 h^3} T^4$$
 (Stefan-Boltzmann ca.

1900)

aus dem Integral über die spektrale Verteilung $S(\nu)$

Energiedichte im Innern^{xiv}
$$w = \frac{2S}{c_0} = \frac{4\pi^5}{15} \frac{k^4}{c_0^3 h^3} T^4$$

Strahlungsbinnendruck^{xv}
$$p = \frac{1}{3} w = \frac{4\pi^5}{45} \frac{k^4}{c_0^3 h^3} T^4$$

Materiedichte
$$\rho = \frac{w}{c_0^2} = \frac{4\pi^5}{15} \frac{k^4}{c_0^5 h^3} T^4 = \frac{4\pi h}{15c_0} \left(\frac{\pi k}{c_0 h} T \right)^4$$

wegen $E = m c_0^2$

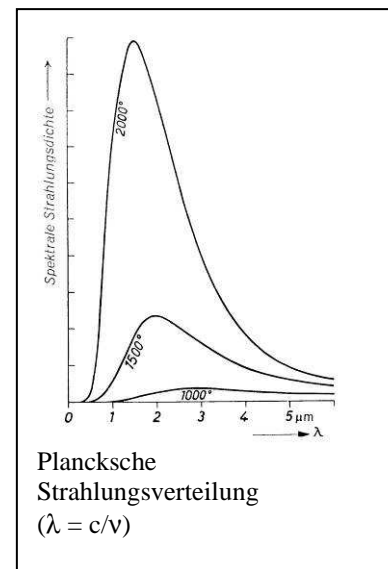
bei $T = 300\text{K}$ (27°C)

wird $\rho = 3.39 \cdot 10^{-23} \text{ kg/m}^3 = 20 \text{ 000 Protonen/m}^3$

und $p = 10^{-6} \text{ Pa} = 10^{-8} \text{ mbar}$ (Ultrahochvakuum)

bei $T = 30\text{K}$ sind es noch 2 Protonen/m^3

bei $T = 3 \text{ K}$ nur noch $2 \cdot 10^{-4} \text{ Protonen/m}^3$



5.3 2. Definition

**Raumgebiet, das nichts mehr enthält, was sich mit
 technischen Mitteln aus ihm entfernen lässt.
 Materie- und strahlungsfreier Raum
 bei $T = 0\text{K}$**

Könnte näherungsweise im interstellaren Raum realisiert sein.

6 Der Äther

Griech. αιτήρ [aitär] = der (blaue) Himmel^{xvi}

Der leere Raum leitet keine Schallwellen, aber elektromagnetische Wellen (Strahlung).

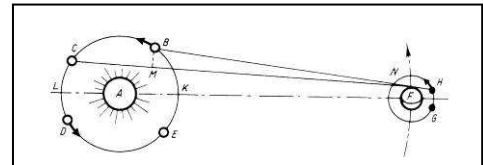
Und dies mit sehr hoher Geschwindigkeit.

Was ist der Träger ?

6.1 Die Messung der (endlichen) Lichtgeschwindigkeit

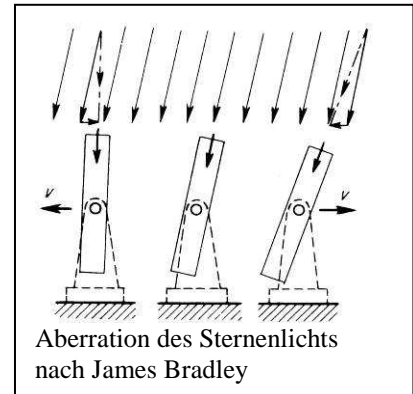
- Galileo Galilei um 1600:
zwei Männer mit Blendlaternen auf zwei Hügeln in 100 m Entfernung, Messung erfolglos.

- Olaf Römer 1676: Die Verfinsterung der Jupitermonde erfolgt nach einem halben Jahr (aus Konjunktion zur Opposition) 20 Minuten später als aus der Umlaufzeit und Zahl der Umläufe vorausberechnet; ein halber Jahr später ist es umgekehrt.

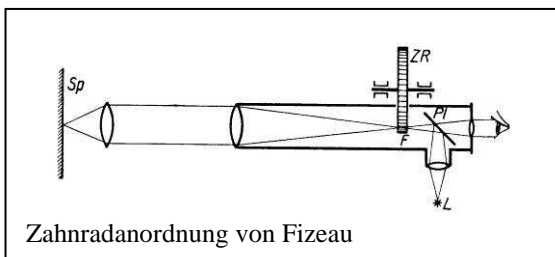


$$c_0 = \text{Erdbahndurchmesser} / 20 \text{ min} = 3 \cdot 10^8 \text{ km} / 1200 \text{ s} = 225.000 \text{ km/s} \text{ xvii, xviii}$$

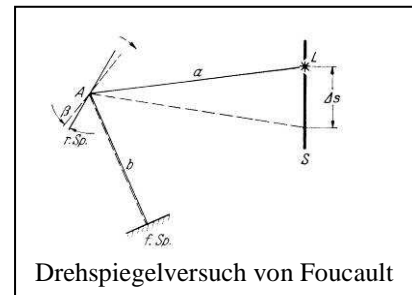
- James Bradley 1727:
Aberration der Sonne und der Fixsterne^{xix}
Neigung im Teleskop bis zu $\phi = 20''$ (ca. 1mm/10m)
liefert $v/c_0 = 1:10210$ ($v = \text{Erdbahngeschwindigkeit} = \pi \cdot \text{Erdbahndurchmesser} / \text{Jahr} = 29,3 \text{ km/s}$)
und $c_0 = 10210 \cdot v = 10210 \cdot 29,3 \text{ km/s} = 299.000 \text{ km/s}$



- Fizeau 1848: Zahnradversuch^{xx}



- Foucault 1849: Drehspiegelversuch :
 $c_0 = 298.000 \text{ km/s}$ ($\pm 10 \text{ km/s}$ in neueren Experimenten)^{xxi}
- Foucault 1850: Licht im Wasser ist langsamer:
 $c = c_0/n$ mit $n > 1$ (S. 400)
- Michelson 1879: Rotating Mirror: $c_0 = 299,910 \pm 50 \text{ km/s}$
- Evenson et. al.^{xxii} 1972: He-Ne-Laser Messung: $c_0 = 299\,792\,456,2 (\pm 1,1) \text{ m/s}$



Andere wichtige Erkenntnisse:

- James Clark Maxwell 1862: Maxwell Gleichungen (On Physical Lines of Force)
- Heinrich Hertz 1886: Licht ist eine elektromagnetische Welle

6.2 Das Wesen des Äthers

- René Descartes 1638: drei verschiedene flüssige Ätherstoffen, aus denen das gesamte Universum gebildet ist. Das Licht ist eine Druckwelle in einem dieser drei Ätherstoffe. Beugungs- und Reflexionserscheinungen des Lichts im Dreistoffmedium.
- René Descartes 1644: Es gibt je einen Äther für die Temperatur, für die elektrischen und die magnetischen Erscheinungen sowie einen für die Gravitation. Magnetismus ist Wirbelbewegung der Ätherflüssigkeit um eine Achse, die in Richtung der magnetischen Pole liegt. Das Licht wird im optischen Äther, entgegengesetzt zu Newtons Meinung, ähnlich wie Schallwellen in der Luft übertragen.^{xxiii}
- Huygens 1690: Licht als Wellenphänomen in Analogie zum Schall in Luft.
- Fresnel 1822: „La lumière n’est qu’un certain mode de vibration d’un fluide universel“^{xxiv}
 - Dichte des Äthers sehr klein: etwa $1,5 \cdot 10^{11}$ mal kleiner als Luft (bei Normalbedingungen) d.h. $\rho = 1.293 \text{ kg/m}^3 / 1,5 \cdot 10^{11} = 0,863 \cdot 10^{-11} \text{ kg/m}^3 = 0,5 \cdot 10^{16} \text{ Protonen/m}^3$
 - Elastizitätskonstante und Härte sehr groß: 100.000 mal härter als Stahl ($E_{\text{st}} = 200 \text{ GPa}$)^{xxv}
 $c_0 = \sqrt{E/\rho} > E = c_0^2 \cdot \rho = 9 \cdot 10^{16} \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot 0,863 \cdot 10^{-11} \text{ kg/m}^3 = 0,777 \text{ MPa}$
- Stokes (1819-1903): der Äther hat die Konsistenz einer dünnen Gallerte oder wie Wachs: « Auf plötzliche Einwirkungen reagiert der Äther wie ein fester Körper; durch einen Hammerschlag wird er zersplittert wie ein Stück Glas; unter der Einwirkung steter Kräfte hingegen fließt er wie eine Flüssigkeit. » Die Planeten führen einen Teil des Äthers mit sich.^{xxvi}
- Lord Kelvin (geb. 1824 als William Thomson): Der Äther ist ein festes elastisches Material, dessen Starrheit $1/10000000 = 10^{-7}$ des Stahls und dessen Dichte 10^{-17} des Wassers beträgt.
- Heinrich Hertz 1884: Dichte $\rho < \rho(\text{H}_2\text{O})/200000$ und Kompressibilität $\kappa < \kappa(\text{H}_2\text{O})/200000$ ^{xxvii}

6.3 Erste Zweifel

- Malus 1808, Fresnel 1820: Polarisation des Lichts erfordert eine Transversalschwingung, Äther ist ein elastischer Festkörper.
- Paul Drude (1863-1906) und Max Abraham (1875-1922) : Der Äther müsste den absoluten Raum (K_0) repräsentieren^{xxviii}
- Fizeau 1851: Lichtgeschwindigkeit in strömenden Flüssigkeiten^{xxix} zeigt nur eine partielle Mitführung des Äthers (in $-v/n^2$)

$$c = c(v) = \frac{c_0}{n} + v \left(1 - \frac{1}{n^2} \right)$$

6.4 Die Widerlegung des Äthers

Die Versuche vom Michelson und Morley

- Michelson (1881), Morley (1887), Pogany (1932):
Licht wird nach Durchlaufen zweier senkrecht zu einander stehenden Wege zur Interferenz gebracht. Die Lichtfrequenzen in beiden Lichtwegen bleiben gleich; aber die Laufzeiten könnten bei gleich langen Lichtwegen unterschiedlich sein, wenn die Ausbreitungsgeschwindigkeiten unterschiedlich wären.^{xxx}

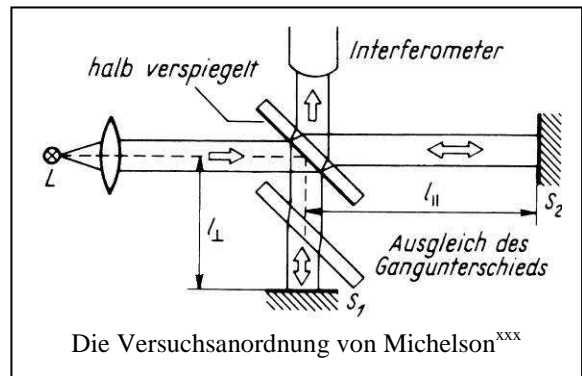
Laufzeitunterschiede werden durch Interferenzen festgestellt.

Nach Justierung auf maximale Interferenz wird die Anordnung (die in einer mit Quecksilber gefüllten Wanne schwamm) um 90° gedreht und die Veränderung der Interferenzen beobachtet.

Es lassen sich keine Veränderungen beobachten!

Erklärung: es gibt keine Abhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von der Ausbreitungsrichtung. Damit war die Spezielle Relativitätstheorie bestätigt und die Äthertheorie widerlegt.

Neuere Messungen von Jaseva, Javan, Murray u. Townes (1964)^{xxxii} mit Laserinterferenzen verringern die Unsicherheit im Geschwindigkeitsunterschied auf $\Delta c < 3\text{mm/s} = 10^{-11} c_0$



6.5 Eine letzte Rechtfertigung

Hendrik Antoon Lorentz 1892

Postuliert einen dynamischen Äther, der im Mittel im absoluten Raume ruht, keinem Vakuum sondern ein Etwas von bestimmten Eigenschaften, dessen Zustand durch zwei gerichtete Größen, das elektrische und das magnetische Feld beschrieben wird. Verzichtet auf die ganze oder teilweise Mitführung des Äthers.

Um das Experiment von Michelson und Morley erklären zu können, griff Lorentz eine Idee von George Fitzgérald (1892) auf: Jeder Körper, der gegen den Äther in Bewegung ist, zieht sich in Bewegungsrichtung abhängig vom Quadrat der Eigengeschwindigkeit (real!) zusammen (Lorentzkontraktion).

Das erklärt, warum Michelson und Morley keine Geschwindigkeitsunterschiede des Lichtes entgegen oder senkrecht zum Äther messen konnten.

Weiter entdeckte Lorentz, dass in einem gleichförmig bewegten System ein anderes Zeitmaß verwendet werden muss, damit alle elektromagnetischen Vorgänge in bewegten Systemen genau so ablaufen wie im absolut ruhenden Äther. Lorentz nannte die Zeitmessung in den verschiedenen Systemen einfach "Lokalzeit".

Im Unterschied zu Einstein entstanden bei Lorentz keine scheinbaren Längenverkürzungen oder Zeitdilatationen, sondern reale.^{xxxiii}

Einstein nutzt die Transformationsgleichungen von Lorentz für seine Spezielle Relativitätstheorie.

7 Die Leere im Mikrokosmos

7.1 Gase

Die Materie besteht aus Atomen, dazwischen ist Leere, damit sich die Atome bewegen können. Das tun sie insbesondere in Gasen.

Nach Avogadro enthalten alle Gase unter gleichen Bedingungen gleich viele Teilchen, nämlich $6,022 \cdot 10^{23}$ in 22,4 Liter bei Normalbedingungen ($T=0^\circ\text{C}$ und $p=1024$ mbar). Dann steht jedem Teilchen ein Volumen von $37,32 \cdot 10^{-27}$ m³ oder eine Zelle von $3,34 \cdot 10^{-9}$ m Kantenlänge zu. Die wirkliche Größe der Teilchen ist jedoch viel geringer (ca. 10^{-10} m, s.w.u.), so dass zwischen ihnen viel leerer Raum (Vakuum) bleibt, von der Strahlung abgesehen.

7.2 Festkörper

Im Festkörper können die Teilchen sich nicht mehr so frei bewegen, sie liegen dichter gepackt. Aus der Packungsdichte (extrapoliert auf $T = 0$ K) lässt sich dann die Größe der Teilchen bestimmen, wenn man annimmt, dass zwischen ihnen kein leerer Raum mehr ist.

Bei Wasser (H₂O) nehmen dann $6,022 \cdot 10^{23}$ Teilchen einen Raum von etwa 18 cm³ ein, füllen jeweils ein Volumen von $3 \cdot 10^{-29}$ m³, einen Würfel von $3,1 \cdot 10^{-10}$ m Kantenlänge.

Ein Eisenwürfel mit ca. 1,9 cm Kantenlänge wiegt 56 g und enthält ebenfalls $6,022 \cdot 10^{23}$ Teilchen, so dass diese Atome $2,275 \cdot 10^{-10}$ m Kantenlänge besitzen, also fast gleich groß sind wie die Wassermoleküle.

7.2.1 Atome und deren Kerne

Selbst im Festkörper ist noch viel freier Raum.

Festkörper sind für Licht im Allgemeinen undurchdringlich, aber von härterer Strahlung können sie durchdrungen werden, wobei die Strahlung abgelenkt wird.^{xxxiii}

Das zeigte Ernest Rutherford 1909 mit seinen Mitarbeitern Geiger und Marsden mit α -Teilchen (He-Kernen), die sie auf eine Goldfolie schossen. Aus der Verteilung der abgelenkten Teilchen schlossen sie, dass diese je nach ihrer Energie bis auf einen Abstand von etwa $r = 10^{-14}$ m an ein schweres Streuzentrum herankommen, in dem (fast) die gesamte Masse eines Atoms vereint zu sein scheint, den Atomkern.

Die Streuung erfolgt durch die elektrostatische Abstoßung des positiv geladenen Kerns gegenüber den ebenfalls positiv geladenen α -Teilchen. Das Volumen des Kerns ist damit ca. 10^{15} mal kleiner als das des Atoms.

Die Größe des Atoms wird im Wesentlichen durch die den Kern umkreisenden Elektronen bewirkt, deren Bahnradien sich in etwa auf die oben angegebenen 10^{-10} m belaufen. Zwischen den umlaufenden Elektronen und dem Atomkern ist wieder jede Menge freier Raum. Dieser Raum ist erfüllt von einem starken elektrischen Feld E zwischen dem positiv geladenen Kern und den negativen Elektronen.

Dieses Feld besitzt eine Energiedichte w , die wiederum zu einer Materiedichte ρ führt.

Abschätzung für das Wasserstoffatom:

$$\text{mittlere Energiedichte: } w = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 = 3 \cdot 10^{17} \text{ J/m}^3$$

$$\text{mittlere Materiedichte: } \rho = w/c^2 = 300 \cdot 10^{15} \text{ J/m}^3 / (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 = 3,3 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{An der Kernoberfläche beträgt die elektrische Feldstärke } E = Q / (4\pi\epsilon_0 r^2) = 10^{21} \text{ V/m}$$

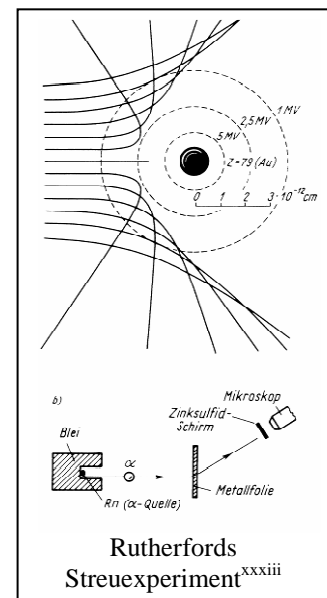
$$\text{die Energiedichte } w = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 = 4,4 \cdot 10^{30} \text{ J/m}^3$$

$$\text{die Materiedichte: } \rho = w/c^2 = 4,4 \cdot 10^{30} \text{ J/m}^3 / (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 = 0,49 \cdot 10^{14} \text{ kg/m}^3$$

$$\text{typische Kerndichte } \rho_K = m_p / (4\pi r^3) = 2,7 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3$$

7.2.2 Die Leere im Kern

Mit noch energiereicherer Strahlung kann man feststellen, dass auch die Kerne im wesentlichen leer sind und ihre Masse in Quarks konzentriert scheint, die selber wieder nur einen Durchmesser von ca. 10^{-18} m aufweisen (etwa der gleichen Größe wie Elektronen). Dieser Raum ist von anderen Feldern erfüllt, den Feldern der starken und der schwachen Wechselwirkung.



8 Das moderne Vakuum

Stand der Dinge um 1900:

Der Äther ist abgeschafft, die Atomtheorie von Demokrit im Wesentlichen voll bestätigt.

Vakuum wird definiert als Zustand des Raums nach Entfernung von Materie und Strahlung durch technische Mittel, zum Beispiel durch Abkühlung auf den absoluten Nullpunkt $T = 0$; es gibt keine Strahlung in ihm und alle Teilchen sind kondensiert.

Dieser Zustand wird gestört durch Effekte der

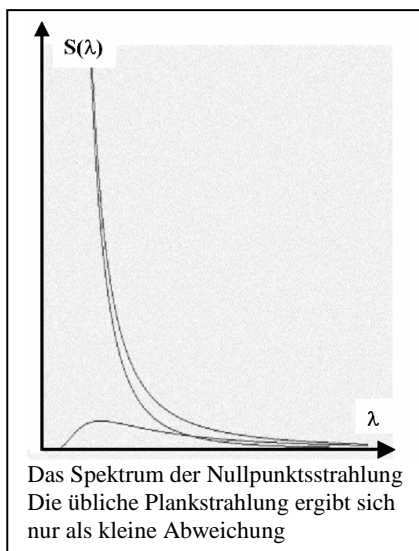
- Quantenmechanik
- Relativitätstheorie

8.1 Die Nullpunktsstrahlung

Auch bei $T = 0$ existiert Strahlung im Vakuum!

Die korrekte Formel für die Hohlraumstrahlung muss lauten:

$$S(\nu) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{(e^{h\nu/kT} - 1)} \right)$$



Sie ist mit der Planckschen Formel bis auf den Zusatzterm ($1/2$) identisch. Dieser Term rührt von der Tatsache her, dass jedes schwingfähige System (und als solches muss wohl auch das Vakuum angesehen werden) eine „unveräußerliche“ Nullpunktsenergie besitzt, die aus der Heisenbergschen Unschärferelation stammt, nach der $\Delta p \cdot \Delta x \geq \hbar / 2 = h / 4\pi$ ist; d.h. weder der Ort der Ruhelage x noch der Impuls $p = mv$ und damit seine kinetische Energie ($1/2 mv^2$) kann jemals exakt gleich null werden, denn dann wäre auch die Unschärfe Δx , bzw. Δv null, was nach Heisenberg nicht möglich ist.

Dieser zusätzliche Term liefert einen Energiebeitrag für ein statistisch fluktuierendes elektromagnetisches Feld mit einer Energieverteilung $u(\nu) \sim h \nu^3$, der also mit ν^3 bzw. λ^{-3} anwächst und auch bei $T = 0$ nicht verschwindet.

Die übliche Plancksche Strahlungsverteilung erweist sich hier nur als leichte Verschiebung der λ^{-3} -Verteilung von S . Das Integral hierüber divergiert, sodass die Gesamtenergie des Strahlungsfeldes stets unendlich ist.

Durch die „Renormierung“ in der Quantenelektrodynamik wird diese Nullpunktsstrahlung wegsubtrahiert, da sie ja allgegenwärtig ist und nur Abweichungen von Bedeutung und messbar sind.

Dieser Term hat auch die besondere Eigenschaft, dass er lorentzinvariant ist, d.h. bei jeglicher Bewegung ihr gegenüber gleich bleibt, also nicht zu spüren ist.

Bei Temperaturen $T > 0$ ist die spektrale Energiedichte nicht mehr lorentzinvariant, sondern von der Bewegung gegenüber dem Vakuum, das von Strahlung erfüllt ist, abhängig, hier greift der (optische) Dopplereffekt.

Bei beschleunigter Bewegung gar (die nach der Allgemeinen Relativitätstheorie einem Schwerfeld entspricht) entsteht ein Strahlungsfeld, dem eine bestimmte Temperatur entspricht.

Im Schwerfeld der Erde ist es die (unglaublich geringe) nicht unterschreitbare Temperatur $T_0 = 4 \cdot 10^{-20}$ K

8.2 Casimir-Effekt

Der Holländer H.G.B. Casimir sagte (1948) theoretisch voraus, dass das Feld der Nullpunktstrahlung einen negativen Druck erzeugt, der z.B. zwischen den Platten eines ungeladenen Plattenkondensators zu einer anziehenden Kraft führt.^{xxxiv}

$$F = A \frac{\pi^2 c_0 h}{240 d^4}$$

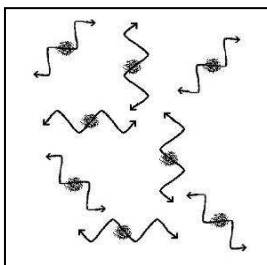
Wobei A die Plattenfläche, d der Plattenabstand und h das Plancksche Wirkungsquantum ist.

Dieser Effekt wurde 1958 von Sparnay experimentell größenordnungsmäßig und 1997 von Lamoreaux exakt nachgewiesen.

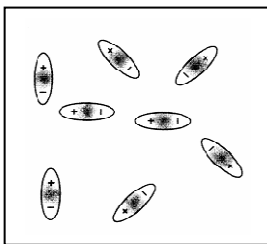
(Da $c_0 h \approx 2 \cdot 10^{-25} \text{ Nm}^2$, muss $d < 10^{-6} \text{ m} = 1 \mu\text{m}$ sein, um merkliche Kräfte zu erhalten)

8.3 Die Vakuumfluktuation

Die Unschärferelation liefert auch $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar / 2 = h / 4\pi$ $[h] = \text{Js} = [\text{Wirkung}]$



Das heißt, für genügend kleine Zeitabschnitte können Energien beliebiger Größe aus dem Nichts entstehen und sofort wieder vergehen. Wegen der notwendigen Erhaltung des Drehimpulses muss diese Strahlung in Form von kurzlebigen Photonenpaaren erscheinen.



Aus diesen Energien lassen sich wieder Teilchen bilden, die wegen der elektrostatischen Neutralität des Vakuums stets in Paaren von Teilchen und Antiteilchen entstehen müssen.

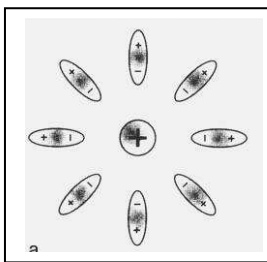
Am leichtesten geht das für Elektron-Positron-Paare

$E_g = 1 \text{ MeV}$, $\Delta t = 6.6 \cdot 10^{-22} \text{ s}$

Die entscheidende Frage ist, wie oft das passiert.

Hier gehen Theorie und Experiment um den Faktor 10^{120} auseinander.

8.4 Vakuumpolarisation^{xxxv}



In starken Feldern, werden die bei der Vakuumfluktuation entstehenden Teilchenpaare ausgerichtet, polarisiert. Das passiert insbesondere in den starken elektrostatischen Feldern in der Umgebung von Elementarteilchen, wie Elektronen und Atomkernen ($E > 10^9 \text{ V/m}$).

Dadurch entstehen Abschirmungseffekte, die Anomalien erzeugen, z.B. das anomale magnetische Moment des Elektrons oder die Lamb-Shift.

Die Engländer Lamb und Retherford zeigten 1955, dass entgegen der bis dahin geltenden Theorie die beiden niedrigsten angeregten Energiezu-

stände des Wasserstoffatoms (2S und 2P) nicht genau die gleiche Energie besitzen sondern um $0,03 \text{ cm}^{-1}$ verschieden sind.

Dies konnte so erklärt werden, dass das Elektron im S-Zustand (Bahndrehimpuls $l = 0$) sich in größerer Nähe zum Atomkern aufhält als das Elektron im P-Zustand ($l = 1$) und dabei die weniger abgeschirmte Ladung des Kerns „sieht“, somit stärker gebunden ist und eine niedrigere Energie besitzt.^{4 xxxvi}

Solche Effekte sind Gegenstand der Statistische Elektrodynamik und der Quantenelektrodynamik, die sich besonders auch mit Selbstenergie des Elektrons beschäftigt, die ebenso wie die Nullpunktstrahlung energetisch divergiert.

⁴ Tatsächlich spielt noch ein weiterer Effekt der Quantenelektrodynamik eine Rolle, nämlich eine „Verschmierung“ des Orts des Elektrons durch den Rückstoß virtuell ausgesandter und absorbierter Photonen (Strahlungskorrektur), der eine etwa doppelt so große Verschiebung in die entgegengesetzte Richtung bewirkt.

9 Das Kosmische Vakuum

Die Frage erhebt sich, ob nicht doch (zumindest denkbare) leere Räume im Weltall existieren können. Dazu muss ein wenig Kosmologie betrieben werden.

9.1 Der Urknall

Vor ca. 13 Milliarden Jahren wird eine „Singularität mit hohem Energieinhalt“ angenommen [Lin]

FALSCH	RICHTIG
- Explosion in einen leeren Raum	der Raum expandiert
- Durchmesser von 1 Pampelmuse nach $2 \cdot 10^{-23}$ Sekunden von $1,7 \cdot 10^{11}$ km = nach 1 Sekunde	der heute sichtbare Raum hatte diese Größe
- alle Masse und Energie war da	potentielle Energie ist negativ, ihr Zuwachs erlaubt die Entstehung von Materie (positive Energie $E = m c^2$)

9.2 Die Kosmische Expansion

Das Modell:

Gegenstände im Universum entfernen sich von einander wie Gegenstände (unveränderlicher Größe) auf einer expandierenden Kugel (Luftballon oder Seifenblase).

Dies kann durch die Rotverschiebung (Dopplereffekt) der Spektrallinien von entfernten Sternen exakt nachgewiesen werden.

$$v = d \cdot H \quad (\text{Hubble, 1929})$$

v = Fluchtgeschwindigkeit

d = Abstand vom Beobachter

H = Hubble-Konstante = 75 ± 25 (d.h. 50 bis 100) km/s pro Mpc = $2,433 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1}$
(1 Mpc = Megaparsec = 3,258 Mill. Lichtjahre = $30,823 \cdot 10^{18}$ km)

$T_H = 1/H = 4,11 \cdot 10^{17} \text{ s} = \underline{13,0 \text{ Milliarden Jahre}} \ (\pm 33\%) = \text{Hubble-Horizont}$

Jenseits einer Entfernung von ca. 13 Milliarden Lichtjahre ist $v > c_0$

Alles Licht jenseits davon erreicht uns nicht mehr (!)

Die spezielle Relativitätstheorie ($v < c_0$) gilt hier nicht mehr !

9.3 Hintergrundstrahlung

Der Kosmos ist von einer (fast) isotropen Hintergrundstrahlung erfüllt, die einer Temperatur von 2,725 K entspricht, mit einem Maximum bei

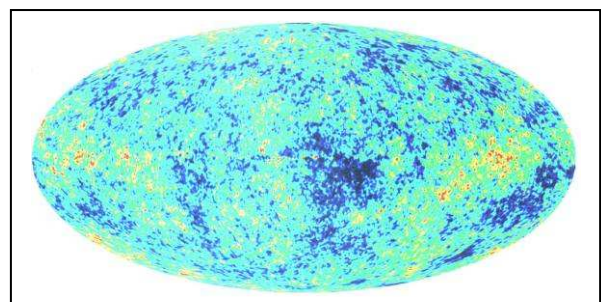
$$\lambda_{\text{max}} = 1,063 \text{ mm}$$

(s.w.o.: bei $T = 3 \text{ K}$ nur noch $2 \cdot 10^{-4}$ Protonen/m³).

Der Wert entspricht der stark rotverschobenen Dissoziationstemperatur des Wasserstoffs zum

Zeitpunkt der Entstehung von Wasserstoffwolken, ca. 400 000 Jahre nach dem Urknall.

Die Himmelstemperaturkarte vom Satelliten WMAP der NASA zeigt Abweichungen in der Größenordnung von Bruchteilen von mK ($2 \cdot 10^{-4} \text{ K}$), aus denen man schließen kann, dass die kosmologische Konstante sehr nahe beim kritischen Wert $k = 0$ liegen muss.^{xxxvii}



9.4 Das Ende der Welt

Das Ende der Welt hängt vom Anfangszustand der Welt ab!

Die Anfangsenergie K des Universums bleibt erhalten (!?)

K = Kosmologische Konstante (Einsteins „größte Eselei“)

sollte dafür sorgen, dass das Universum nicht expandiert, sondern statisch bleibt, denn die ursprüngliche Fassung der Allgemeinen Relativitätstheorie sagte ein Expansion voraus (1917)

Berechnung der Expansion des Universums durch Friedmann (1927)^{xxxviii}
aus dem Energieerhaltungssatz für eine Probemasse m :

$$\frac{1}{2} mv^2 - G \cdot M \cdot m/r + 2 \cdot k \cdot m = 0$$

Hierin sind:

Kosmologische Konstante k

Cavendish's Gravitationskonstante $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$

Kosmische Gesamtmasse $M = \rho \cdot 4\pi/3 R^3 = \text{const}$

Geschwindigkeit $v = dr/dt$

Am Rand des Universums ist $r = R = R(t)$ die größtmögliche Entfernung im Kosmos, im übertragenen Sinne der Gegenpol auf der expandierenden Seifenblase.

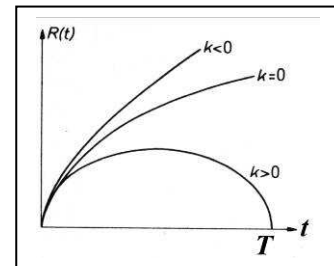
Hieraus lässt sich auch die Hubble-Konstante angeben:

$$H(t) = \dot{R} / R = \sqrt{\left(\frac{8\pi G}{3} \rho(t) - \frac{k}{R^2} \right)}$$

Die Lösung der DGL liefert für $R(t)$ 3 unterschiedliche Ergebnisse je nach Kosmologischer Konstante k

1. Die Expansion verringert sich ($k > 0$) bis zum Stillstand und Kontraktion; oszillierendes Universum mit $T = 2\pi GM k^{-3/2}$
2. Die Expansion bleibt konstant ($k = 0$); flaches Universum
3. Die Expansion nimmt zu ($k < 0$); offenes Universum

Die Messungen von H und damit der Wert von k ist noch zu unsicher, um ein Modell unwiderlegbar zu bestätigen.



Der Wert von H hängt stark von der Gesamtmasse M (Gesamtenergie), bzw. Dichte ρ des Universums ab. Innerhalb der Messgenauigkeit ist aber $k = 0$

$$H = \sqrt{\left(\frac{8\pi G}{3} \rho \right)} \quad \text{ergibt } \rho = 1,06 \cdot 10^{-26} \text{ kg/m}^3 = 6,34 \text{ Protonen/m}^3$$

Dann müsste derzeit

die mittlere Dicht im Universum $\rho_0 = 10,6 \cdot 10^{-27} \text{ kg/m}^3 \approx 6 \text{ Protonen/m}^3$ sein

die Gesamtmasse des Universums $M = 2 \cdot 10^{54} \text{ kg} \approx 10^{24} \text{ Sonnenmassen}$

das Volumen $V = M/\rho = 0,5 \cdot 10^{81} \text{ m}^3$

der Radius $R = (3V/4\pi)^{1/3} = 0,5 \cdot 10^{27} \text{ m} = 53 \text{ Milliarden Lichtjahre}$

Er ist also etwa 3 mal so groß wie der Hubble-Horizont (13,7 GLj)

d.h. wir sehen vom gesamten Universum etwa nur 1/27.

10 Die Quintessenz

Die Gesamtmasse des Universums

Gesamtmasse ca. $2 \cdot 10^{54}$ kg = 10^{24} Sonnenmassen

Gesamtdichte ca. 6 Protonen / m³

10.1 Materie

Materie wird in Galaxien durch Schwerkraft gebunden

10.1.1 Gewöhnliche Materie

Atome (Elektronen, Protonen, Neutronen)

- in Sternen haben am Universum einen Anteil von ca. 0,7% d.h. etwa 0,04 Protonen/m³,
- im Kosmos als nichtleuchtende Materie verteilt ca. 3,7% d.h. etwa 0,2 Protonen/m³

10.1.2 Dunkle Materie

Materie, die mit keine Wechselwirkung mit elektromagnetischen Feldern oder Photonen aufweist,
z.B. Neutrinos im Sonnenwind und Mesonen

Anteil am Universum ca. 25% d.h. etwa 1,6 Protonen/m³

10.2 Strahlung

Auch Strahlung wird in Galaxien durch Schwerkraft gebunden, besonders in Schwarzen Löchern.
Die Hintergrundstrahlung (2,73 K) liefert nur 0,005 % zur Gesamtmasse

10.3 Die Quintessenz

Die fehlenden 70% der Gesamtmasse soll eine „Dunkle Energie“ beitragen, [Wett]

Galaktische Felder, ohne direkte Wechselwirkung mit Materie und Strahlung.

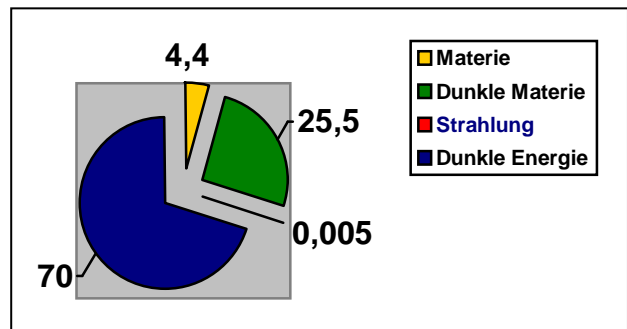
Die entsprechenden Teilchen sollen sich gegenseitig abstoßen, wie gleichnamige Ladungen,
dadurch sind sie im Universum gleichmäßig verteilt und

„Etwas Gleichverteiltes kann keine wirkende Kraft auf andere Körper ausüben“

Die Dunkle Energie führt zu negativem Druck und führt zur beschleunigten Expansion des
Universums, einer zusätzlichen Rotverschiebung.

10.4 Die Bestandteile vom Nichts

- leuchtende Materie (0,7%)
- nichtleuchtende Materie (3,7%)
- dunkle Materie (25,5%)
- Strahlungsenergie (0,005%)
- Dunkle Energie (70%)



10.5 Resumee

**Der Raum ist nicht leer
Es gibt keinen Ort wo nichts ist
(wie bei Aristoteles vor fast 2400 Jahren)
Es wird eine allgegenwärtige Substanz postuliert
(wie weiland der Äther)**

11 Die Materialeigenschaften des Vakuums

Es wird darüber spekuliert, ob die Naturkonstanten eine Folge der Eigenschaften des Raumes sind

11.1 Naturkonstanten

Name	Symbol	Wert	\pm (ppm)	Dimension
Lichtgeschwindigkeit	c_0	299 792 458 m/s	0	LT^{-1}
Gravitationskonstante	G	$6,6742 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/(\text{kg s}^2)$	12	$M^{-1}L^3T^{-2}$
Planckkonstante	h	$6.6260693 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$	0,60	ML^2T^{-1}
Boltzmannkonstante	k	$1,3806505 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$	8,5	$ML^{-2}T^{-2} \Theta^{-1}$
Elementarladung	e	$1,60217653 \cdot 10^{-19} \text{ As}$	0,30	TI
Magnetische Feldkonstante	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$	0	$MLT^{-2}I^{-2}$
Elektrische Feldkonstante	$\epsilon_0 = 1/\mu_0 c^2$	$8,854187817 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$	0	$M^{-1}L^{-3}T^{-4}I^2$

Tatsächlich ist μ_0 bzw. ϵ_0 frei wählbar und legt das verwendete Maßsystem fest^{xxxix}

Direkt messbare Größen, die von keinem Maßsystem abhängen, sind:

Vakuumllichtgeschwindigkeit $c_0 := 299\,792\,458 \text{ m/s}$

Vakuummwellenwiderstand $Z_0 = (\mu_0/\epsilon_0)^{1/2} = \mu_0 c_0 = 376.73 \Omega$

Lediglich die Zahlenwerte und Maßeinheiten hängen vom gewählten Maßsystem ab!

Dennoch wird Z_0 fast nirgends als Naturkonstante zitiert.

Dagegen findet man oft als universelle Naturkonstante den Wert der Feinstrukturkonstante:

$$\alpha = e_0^2/(2\epsilon_0 hc_0) = 1/137,0359895$$

in die der (beliebige) Wert von ϵ_0 eingeht.

11.2 Abgeleitete Größen

Aus den Naturkonstanten lassen sich leicht Größen ableiten, welche die Basisdimensionen des SI (Système International d'Unités) besitzen, sie liegen zumeist weit außerhalb unserer technischen Meßbereiche und könnten Grenzwerte unserer heutigen Physik darstellen.^{xi}

Name	Definition	Wert	Dimension
Planck'sche Länge	$l_P = (Gh/c^3)^{1/2}$	$4,03 \cdot 10^{-35} \text{ m}$	L
Planck'sche Masse	$m_P = (hc/G)^{1/2}$	$5,42 \cdot 10^{-7} \text{ kg}$	M
Planck'sche Zeit	$t_P = l_P/c = (Gh/c^5)^{1/2}$	$1,373 \cdot 10^{-43} \text{ s}$	T
Planck'sche Temperatur	$T_P = k^{-1}(c^5 h/G)^{1/2}$	$3,63 \cdot 10^{32} \text{ K}$	Θ
Elementarladung	e	$1,60217653 \cdot 10^{-19} \text{ As}$	$Q = IT$

11.3 Spekulationen

1. Die endliche Lichtgeschwindigkeit wird als „Reibung“ der Photonen mit der Dunklen Energie betrachtet^{xli}.
2. Der Lichtausbreitung im Vakuum wird eine Körnigkeit (Granularität) zugeschrieben, ähnlich wie bei der Schallausbreitung unterhalb der molekularen Abmessung im Schallausbreitungsmedium^{xlii}.

Quellen

- [Boy] T.H. Boyer: Das Vakuum aus moderner Sicht. Spektrum der Wissenschaft, Okt. 1985.
 [Genz] Genz, Henning: Nichts als das Nichts. 2004 in Weinheim bei Wiley-CH Verlag
 [Gerth] Gerthsen, Ch.: Physik. 5.Auflage, 1958 in Heidelberg bei Springer,
 [Gri] Grimsehl's Lehrbuch der Physik – Teil 1. 9. Aufl. 1954 in Stuttgart bei Ernst Klett
 [Her] Heraeus GmbH (Hsg): Festschrift 60 Jahre Quarzglas, 25 Jahre Hochvakuumtechnik. Hanau 1961
 [Lin] Charles H. Lineweaver und Tamara M. Davis: Der Urknall – Mythos und Wahrheit. Spektrum der Wissenschaft, Mai 2005
 [Sexl] Sexl, R. u. H.: Weiße Zwerge – Schwarze Löcher. 1975 in Reinbek bei Rowohlt
 [Sim] K. Simonyi: Kulturgeschichte der Physik. Von den Anfängen bis heute. 3. Aufl. 2001 bei Harri Deutsch in Frankfurt am Main
 [Stö] Stöcker, H.: Taschenbuch der Physik. 5. Aufl. 2005 bei Harri Deutsch, Ffm.
 [Wett] Wetterich, C.: Quintessenz – die 5. Kraft. Physik-Journal Dez. 2004

ⁱ G. Lochmann, private Mitteilung

ⁱⁱ [Sim] S. 72ff

ⁱⁱⁱ <http://de.wikipedia.org/wiki/Montgolfier>

^{iv} [Stö] S. 576

^v [Her] S. 50

^{vi} [Her] S. 56

^{vii} [Gri] S. 53

^{viii} <http://de.wikipedia.org/wiki/Kreiselpumpe>

^{ix} <http://de.wikipedia.org/wiki/Vakuumpumpe>

^x W. Beetz: Leitfaden der Physik. 1890 in Leipzig bei Th. Griebner

^{xi} <http://de.wikipedia.org/wiki/Wasserstrahlpumpe>

^{xii} [Gerth] S.430

^{xiii} [Gerth] S.429f

^{xiv} Paus, H.J.: Physik in Experimenten und Beispielen. 1995 in München bei Hanser. S. 817

^{xv} [Gerth] S.448

^{xvi} <http://de.wikipedia.org/wiki/Äther>

^{xvii} [Sim] S. 278

^{xviii} [Gerth] S.378

^{xix} [Sim] S. 400

^{xx} [Gerth] S.377

^{xxi} [Gerth] S.377

^{xxii} K. M. Evenson, J. S. Wells, F. R. Petersen, B. L. Danielson, G. W. Day, R. L. Barger, and J. L. Hall, Speed of Light from Direct Frequency and Wavelength Measurements of the Methane-Stabilized Laser, Phys. Rev. Lett. 29, 1346-1349 (1972).

^{xxiii} <http://www.safeswiss.org/infoecke/aetherindernaturwissenschaft.htm>

^{xxiv} [Sim] S. 350

^{xxv} <http://www.miriup.de/spur/4.6.html>

^{xxvi} [Sim] S. 351

^{xxvii} [Genz] S. 35

^{xxviii} [Sim] S. 351

^{xxix} [Sim] S.400

^{xxx} [Sim] S. 401

^{xxxi} [Sim] S. 402

^{xxxii} <http://www.safeswiss.org/infoecke/aetherindernaturwissenschaft.htm>

^{xxxiii} [Sim] S. 387

^{xxxiv} <http://de.wikipedia.org/wiki/Casimir>

^{xxxv} <http://de.wikipedia.org/wiki/>

^{xxxvi} W. Hartmann, Univ. Tübingen; private Mitteilung

^{xxxvii} [Wett]

^{xxxviii} [Sexl] S. 109 f

^{xxxix} J.D. Jackson: Classical Electrodynamics. 2. Ed. 1975 bei Wiley & Sons. S. 817

^{xl} [Sim] S. 435

^{xli} Vgl. Titelthema: Das neue Bild vom Kosmos. In Spektrum der Wissenschaften, März 1999

^{xlii} Jacobson, Th.A. und R. Parentani: Das Echo der Schwarzenlöcher. In Spektrum der Wissenschaft, April 2006