

EINSTEINS RELATIVITETSTEORI

Thomas Møllergaard Amby

- Marselisborg Gymnasium -

2014

© Thomas Møllergaard Amby 2014

Dette værk er trykt med Arial 10pt / 12.6pt

Formatet er A5 duplex

Layout og typografi af forfatteren ved hjælp af L^AT_EX

Alle figurer er lavet med METAPOST



Indhold

*	i
1 Indledning	1
2 Klassisk Fysik	3
3 Galilei Transformationen	5
3.1 Initialsystemer:	6
3.2 De fysiske loves uforanderlighed:	6
3.2.1 Einsteins første postulat:	6
3.2.2 Einsteins andet postulat:	7
3.3 Galilei og de klassiske koordinat transformationer:	9
3.3.1 Galileis koordinat transformationer:	9
3.3.2 Galileis hastigheds transformation:	10
3.3.3 Galilei transformationernes problemer løses:	11
4 Lysets Tøven	13
5 Lysets Hastighed	17
6 Michelson & Morley	21
6.1 Michelson-Morley & æterteorien	22
6.2 Michelson-Morley eksperimentet	22
6.3 Resultatet af Michelson & Morleys eksperiment	23
6.4 Arven efter Michelson & Morley:	24
7 Einsteins Biografi	25
7.1 Mileva & Einstein	27
7.2 Politiske holdninger	28

7.3 Einstein & atombomben	29
8 Almene & Speciel Relativitetsteori	31
9 Tidsforlængelse	35
9.1 Hvad er tid?	36
9.2 Kalenderen	36
9.3 Vi bestemmer tiden	37
10 Tvillingeparadokset	39
11 Samtidigheid	43
12 Lorentz Transformationen	47
13 Lorentz Transformationen & Tidsmaaling	51
14 Relativistisk Masseforøgelse & Hastighedsaddition	55
15 Relativistisk Mekanisk Energi	59
16 Ækvivalensen mellem masse & energi	63
*	67

Indledning

ledning

Life is an experiment.

A. Einstein

Følgende note er tænkt som et supplement til lærebøgerne om emnet *relativitetsteori*. Emnet er ikke dækket i det ønskede omfang af bøgerne, hvorfor jeg sammen med fysik A-niveau holdet årgang 2012 fra Marselisborg Gymnasium har kastet mig over dette emne. I gennem emnet har vi brugt litteratur fra flere forskellige kilder bl.a. “*Relativity An introduction to space-time physics*” ~~Adams~~¹⁹⁹⁷ (1997) såvel som “*University Physics*” ~~Young and Friedman~~²⁰⁰⁵ (2004). Hertil kommer forskellige noter som har været anvendt i mindre omfang. Hvorfor de ikke er nævnt i denne indledning.

Klassisk Fysik

skFysik

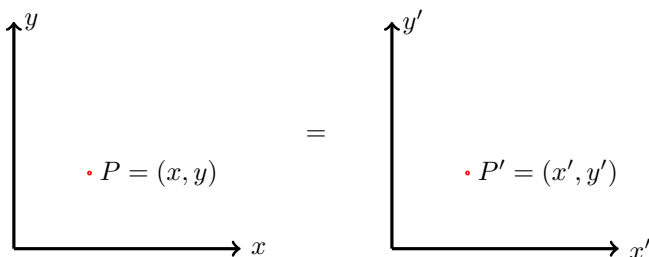
Life is an experiment.

A. Einstein

En del af fundamentet for den klassiske mekanik er, at den kan beskrives ved *tid*, *sted*, *masse* og *kraft*.

Ligeledes er det en forudsætning at naturlovene beskriver relationerne mellem disse fysiske størrelser, disse udtrykkes som oftest gennem matematiske ligninger.

Endvidere skal naturlovene være modsigelsesfrie, og de skal kunne verificeres gennem eksperimenter. En sidste ting som ville være ønskværdigt, er at de fysiske love kan overføres fra et initialsistem til et andet initialsistem. Der skal så at sige være ligeværdighed mellem alle tænkelige koordinatsystemer.



Det til trods havde flere af fysikere i slutningen af 1800-tallet og begyndelsen af 1900-tallet en forestilling om at der fandtes et absolutsystem, som kunne favoriseres frem for alle andre initialsistem. Til dette system var knyttet et hypotetisk medium kaldet “*Æteren*”, tanken var at æteren fyldte hele universet, og at lys kunne udbrede sig i æteren på samme vis som lydbølger udbredes i luft.

Galilei Transformationen

ationen

Life is an experiment.

A. Einstein

Contents

3.1 Initialsystemer:	6
3.2 De fysiske loves uforanderlighed:	6
3.2.1 Einsteins første postulat:	6
3.2.2 Einsteins andet postulat:	7
3.3 Galilei og de klassiske koordinat transformationer:	9
3.3.1 Galileis koordinat transformationer:	9
3.3.2 Galileis hastigheds transformation:	10
3.3.3 Galilei transformationernes problemer løses:	11

Vi vil starte med at beskrive forskellige reference rammer. Disse kaldes initialsystemer

INITIALSYSTEMER:

systemer

I fysik anvender man i forbindelse med relativitetsteorien begrebet *initialsystemer*. Vi vil nu ganske kort gennemgå hvad der karakteriserer et initialsystem.

Inden for fysikken afvender vi betegnelsen *initialsystem* om et koordinatsystem, hvor alle legemer som ikke er påvirket af ydre kræfter

kraft, og som derfor bevæger sig med konstante hastigheder. Der findes uendeligt mange initialsystemer, der bevæger sig med konstante hastigheder. Det vil med andre ord sige, at et koordinatsystem som indeholder en partikel P , skal opfylde Newtons første lov for at det kan betegnes som et initialsystem.

“En partikel som ikke er påvirket af en ydre resulterende kraft vil enten ligge stille eller bevæge sig med konstant hastighed langs en ret linje.”

Sir Issac Newton

DE FYSISKE LOVES UFORANDERLIGHED:

Lad os se lidt mere på de to postulater som den specielle relativitetsteori er baseret på. Begge postulater beskriver hvad en observatør i et initialsystem ser. Teorien er speciel da denne indvirker på observatører i netop sådan et specielt initialsystem.

Einsteins første postulat:

Den specielle relativitetsteori som Albert Einstein udviklede er hovedsagligt baseret på to postulater. Det første postulat går også under navnet *det relativistiske princip* eller *relativitets princippet*. Postulatet lyder som følger:

“De fysiske love er de samme i alle initialsystemer.”

Med udgangspunkt i dette postulat kan man indse, at var de fysiske love forskellige i forskellige initialsystemer ville man kunne skelne et initialsystem fra et andet, eller gøre et system mere “*rigtigt*” end et andet initialsystem. Se nedenstående to eksempler.

[*Eksempel 1 - De legende børn*: Antag at du iagttager to børn som spiller et spil hvori det gælder om at gribe en bod som den anden har kastet, alt imens I alle tre kører i et tog som bevæger sig med konstant hastighed. På baggrund af dine observationer af boldens bevægelse, vil du (uanset hvor umage du gør dig med observationerne), ikke kunne afgøre med hvilken hastighed toget kører. Grunden til dette er at Newtons bevægelseslove er de samme i alle initialsystemer.

Eksempel 2 - Magneten og spolen:

I et andet eksempel kigger vi på den kraft som induceres i en spole når man bevæger en permanent magnet i nærheden af den. I det initialsystem hvor *spolen* er i hvile, vil den bevægende magnet resultere i en ændring af den magnetiske flux gennem spolen, hvilket resultere i en induceret kraft.

I et andet men lige så godt initialsystem vil vi opfatte *magneten* som værende i hvile. Her vil spolens bevægelse gennem det magnetiske felt inducere en kraft. I følge relativitetsteorien er begge disse initialsystemer lige gode, hvorfor det også må være den samme kraft som induceres i begge tilfælde.

Vi skal nu se lidt på Einsteins andet postulat som er den anden hjørne sten i den specielle relativitetsteori.

Einsteins andet postulat:

Igen gennem det nittendeårhundrede, troede de fleste fysikere at lyset bevægede sig gennem et hypotetisk medium kaldet *æteren*, på samme måde som lydbølger bevæger sig gennem luften. Hvis dette var tilfældet ville lysets fart målt af en observatør afhænge af dennes bevægelse relativt til æteren, og ville derfor være forskellig i forskellige retninger. Michelson-Morley eksperimentet som beskrives i kapitel ^{sec:MichelsonMorley}6, var et forsøg på at detektere Jordens bevægelse relativt til æteren.

Einsteins særlige forståelse var at indse at hvis Maxwell's ligninger er gyldige i alle initial systemer, så må lysets hastighed i vakuum også være den samme i alle systemer og i alle retninger. Dette var også grunden til Michelson og Morley *ikke* kunne måle nogen æter, derfor er æter begrebet også blevet droppet. Selvom Einstein muligvis ikke har kendt til Michelson og Morleys negative resultater er det den første underbygning af hans på dette tidspunkt dristige teori om konsistensen af lysets fart i vakuum. Einsteins andet postulat lyder således:

“Lysets hastighed i vakuum er dens amme i alle initialsystemer og er uafhængig af lyskildens bevægelse.”

Lad os et øjeblik tænke over hvad det andet postulat har af betydning. Antag at to observatører måler lysets hastighed i vakuum. Den ene observatør er i *hvile* i forhold til lyskilden, og den anden bevæger sig væk fra lyskilden. Begge observatører befinder sig i initialsystemer. Ifølge de relativistiske princip, *skal* de to observatører få det samme resultat, selv om den ene bevæger sig i forhold til den anden.

Eksempel 3 - Rumskibet og missilet:

Hvis dette virker lidt for indlysende, så overvej da følgende situation: Et rumskib bevæger sig forbi Jorden med hastigheden 1000 m/s. Rumskibet skyder nu et missil afsted med hastigheden 2000 m/s, relativt til rumskibet.

Hvad er nu missilets fart, relativt til Jorden?

Indlydende, vil du sandsynligvis svare. Det er da et elementært spørgsmål om relativ hastighed. I følge den klassiske mekanik og Newton er det korrekte svar 3000 m/s.

Eksempel 4 - Rumskibet og lysstrålen:

Lad os nu antage at rumskibet tænder en søgelampe, som peger i den retning som missilet fra *eksempel 3* blev skudt i. En observatør på rumskibet måler lysets hastighed for søgelampen, og finder frem til hastigheden, c . I følge Einsteins andet postulat, kan bevægelsen af lyset efter det har forladt lyskilden *ikke* afhænge af lyskildens bevægelse. Derfor vil en observatør på Jorden som også måler hastigheden af lyset fra søgelampen også opnå resultatet c og ikke som man umiddelbart skulle tro, jf. den klassiske mekanik $c + 1000\text{m/s}$.

Dette står i kontrast til vores elementære forståelse af relative hastigheder, og det kan endda stride mod almindelig sund fornuft. Men husk da på, at *sund fornuft* er baseret på hverdags erfaringer, og det inkluderer normal vis ikke måling af lysets hastighed.

Med Einsteins andet postulat følger imidlertid en begrænsning, nemlig

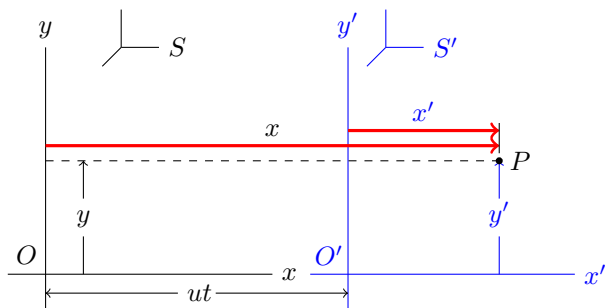
“Det er umuligt for en observatør i et initialsystem, at bevæge sig med hastigheden c , lysets hastighed i vakuum.”

Denne begrænsning kan nu underbygges ved at vise, at bevægelse med hastigheden c medfører logisk modstrid. Vi begynder med, antage at rumskibet i S' bevæger sig med lysets hastighed i forhold til en observatør på Jorden, således at hastigheden $v_{S'/S} = c$. Hvis rumskibet tænder en fremadrettet lygte, vil Einsteins andet postulat medvirke at observatøren på Jorden S , måler lysstrålen fra lygten til ligeledes at bevæge sig med hastigheden c . Hvorfor denne observatør vil observere at lysstrålen og rumskibet følges ad samt at de til enhver tid vil være på det samme sted i rummet.

Men Einsteins andet postulat medfører også at lysstrålen bevæger sig med hastigheden c relativt til rumskibet, dermed kan de *ikke* være på det samme sted i rumme. Denne modstrid kan kun undgås hvis, og kun hvis det *ikke* er muligt for en observatør i et initialsystem at bevæge sig med lysets hastighed.

GALILEI OG DE KLASSISKE KOORDINAT TRANSFORMATIONER:

Lad os nu omformulere ovenstående betragtninger om Einsteins andet postulat til et symbolsk argument, ved at anvende to initialsystemer. Vi anvender symbolet S for observatøren på Jorden og S' for observatøren i rumskibet i bevægelse, som vist på figuren herunder.



Galileis koordinat transformationer:

For at holde tingene så simple som muligt, har vi udeladt at tegne z -akserne i koordinatsystemerne. x -akserne i de to koordinatsystemer følger den samme linje, men origo i det mærkede koordinatsystem S' , O' bevæger sig relativt til origo O , for det umærkede koordinatsystem S . Bevægelsen sker med den

konstante hastighed u og det er som sagt langs den fælles $|xx'|$ -akse. Tidsmålingen i forhold til de to koordinatsystemer er defineret således at $t = t' = 0$ der hvor $O = O'$. Vi definere med andre ord at tiden $t = 0$ og $t' = 0$ når de to koordinatsystemers nulpunkter er sammenfaldende. Det betyder at de to koordinatsystemers indbyrdes afstand til ethvert senere tidspunkt t er ut .

Overvej nu hvorledes man kan bestemme bevægelsen for en partikel P . P kunne være et udforskningskøretøj som er udsendt fra rumskibet, eller en lyspuls fra en laser. Vi kan beskrive *positionen* af denne partikel ved hjælp af de sædvanlige rumlige koordinater (x, y, z) i S som set fra Jorden eller man kunne anvende koordinaterne (x', y', z') i S' , som set fra rumskibet.

Vi ønsker altså med andre ord at udvikle en beskrivelse af sammenhængen mellem koordinaterne x, y og z i S og koordinaterne x', y' og z' i S' dette kan vi også skrive som

$$(x, y, z) \mapsto (x', y', z')$$

Det sidste vi mangler er den 4. koordinat. Her er der tale om tidskoordinaten. Det betyder at hvor vi normalt er vant til at arbejde i en tre dimensionel model skal vi nu til at håndtere en fire dimensionel model. Vi husker på at t er defineret som tiden fra O og O' var sammenfaldende. Derfor bliver vores rigtige koordinat transformation givet ved et firepunkts koordinat.

$$(x, y, z, t) \mapsto (x', y', z', t')$$

På baggrund af ovenstående figur kan vi nu udlede, de fire nedenstående sammehænge:

$$x = x' + ut \quad (\text{G.1}) \quad \boxed{\text{eq:Gx}}$$

$$y = y' \quad (\text{G.2}) \quad \boxed{\text{eq:Gy}}$$

$$z = z' \quad (\text{G.3}) \quad \boxed{\text{eq:Gz}}$$

$$t = t' \quad (\text{G.4}) \quad \boxed{\text{eq:Gt}}$$

De første tre ([G.1](#) - [G.3](#)) kaldes Galileiske koordinat transformationer eller Galilei transformationerne (i daglig tale). Hvorimod ligning ([G.4](#)) mere er en slags forudsætning. Fra den Newtonske mekanik kan man finde noget tilsvarende men det skal vi ikke nærmere ind på her.

Galileis hastigheds transformation:

Hvis vores partikel P bevæger sig i x -aksens retning, og dens momentane hastighed v_x målt af en observatør i hvile i S så må $v_x = dx/dt$. Da det vides at hastighed er strækning pr. tid. Ligeledes må en observatør i hvile i

initialsystemet S' måle partiklens hastighed til v'_x som ligeledes er $v'_x = dx'/dt$. Derved kan vi nu udlede en relation mellem hastighederne v_x og v'_x , ved at tage den afledte mht. t af den første ligning (eq:Gx) i Galilei transformationerne.

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dx'}{dt} + u$$

Her er dx/dt hastigheden v_x målt i S mens dx'/dt er hastighed v'_x målt i S' , heraf følger den Galileiske hastigheds transformation som kan skrives på formen:

$$v_x = v'_x + u \quad (\text{G.5}) \quad \boxed{\text{eq:Gv}}$$

Man ser nu at der er et fundamentalt problem med denne transformation (eq:Gv) (G.5). Hvis vi anvender hastigheder som er sammenlignlige med lysets hastighed, vil ligningen nemlig give følgende resultat, $c = c' + u$. Dette bryder med Einsteins andet postulat og det er i direkte modstrid med eksperimentelle undersøgelser som konkludere at $c = c'$ som forudsagt af Einstein. Dette er en ægte uoverensstemmelse, og det er ikke blot en illusion, derfor er vi nødt til at løse problemet. Hvis vi tager Einsteins postulat for gode varer, så medfører det at vi må forkaste Galilei transformationerne som værende korrekt, til trods for at vi på fornemste vis kunne udlede dem. Disse ligninger behøver modifikationer for at bringe dem i overensstemmelse med det relativistiske princip og samt det andet postulat fra Einstein.

Galilei transformationernes problemer løses:

Løsningen involverer nogle yderst fundamentale modifikationer i vores kinematiske forståelse. Den første ide, som skal ændres er den antagelse at observatørens initialsystemer S og S' anvende den samme *tidsskala*, tidligere defineret som $t = t'$, jf. ligning (eq:Gt) (G.4). Eller som er ved, at vise denne hverdags antagelse kan næppe være rigtig, de to observatører **må** have forskellige tidsskalaer. Vi **må** deffiniere hastigheden $v' = dx'/dt'$ og altså ikke dx'/dt . De to størrelser er *ikke* den samme. Vi kommer nærmere ind på løsningen af problemerne med Galilei transformationerne i kapitlet sec:LorentzTransformationen 12

Lysets Tøven

Lysets Tøven

Life is an experiment.

A. Einstein

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis

porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

Lysets Hastighed

stighed

Life is an experiment.

A. Einstein

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis

porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

Michelson & Morley

nMorley

Life is an experiment.

A. Einstein

Contents

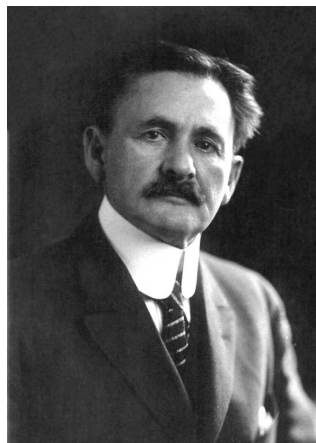
6.1	Michelson-Morley & æterteorien	22
6.2	Michelson-Morley eksperimentet	22
6.3	Resultatet af Michelson & Morleys eksperiment	23
6.4	Arven efter Michelson & Morley:	24

MICHELSON-MORLEY & ÆTERTEORIEN:

I 1887 publicerede de to amerikanske fysikere Albert A. Michelson (se figur 6.1) og Edward W. Morley (se figur 6.2) resultaterne af hvad der sidenhen er blevet kendt som Michelson-Morley eksperimentet.

De to fysikere forsøgte at påvise eksistensen af et medium hvor i lys kunne udbredes. Deres ide var som de fleste andre naturvidenskabs folk på dette tidspunkt at tolke lys som et bølgefænomen. Da vi fra bølgenes verden ved at bølger som f.eks. lyd kræver et medium at udbredes i f.eks. luft. Så måtte lys der jo var elektromagnetiske bølger ligeledes kræve et medium at udbredes i. Mediet blev kaldt *æteren*. De prøvede altså at detektere en relativ bevægelse af stof gennem den stationære æter. Deres forventede resultat udeblev og deres målinger antages idag for at være et stærkt bevis for at æterteorien ikke var korrekt, ligeledes blev det startskuddet til den forskning som ledte frem til udviklingen af den specielle relativitetsteori, hvori æter teorien ikke spiller nogen rolle.

Æteren er med andre ord et hypotetisk medium, hvori elektromagnetisk stråling som lys kan udbredes. Ifølge æterteorien ville lysets hastighed i forhold til Jorden variere på grund af Jordens bevægelse gennem æteren. F.eks. ville lyshastigheden være mindst, når Jorden bevæger sig i samme retning som lyset, og størst når Jorden bevæger sig i modsat retning af lyset.



Figur 6.1 – Albert A. Michelson

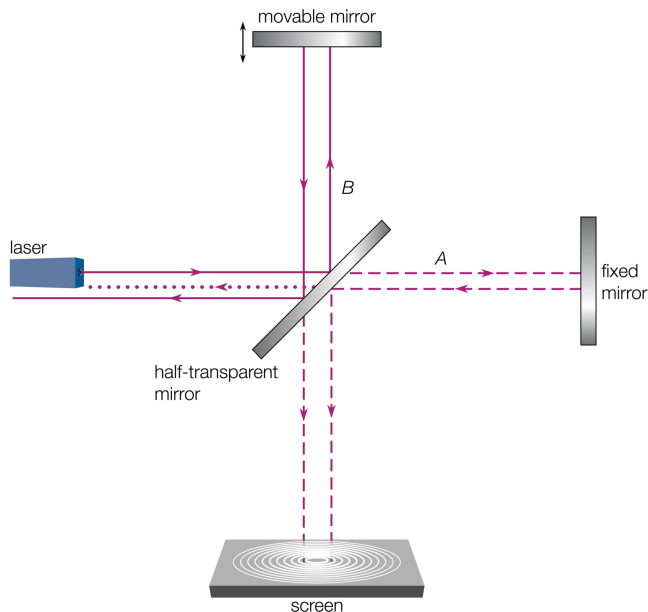


Figur 6.2 – Edward W. Morley

MICHELSON-MORLEY EKSPERIMENTET:

Michelson og Morley designede et forsøg hvor en lysstråle sendes fra en lyskilde parallelt med Jordens bevægelsesretning gennem et halvgennemsigtigt spejl, således at lysstrålen deles i to. Den ene del af lyset sendes direkte gennem spejlet til et nyt spejl hvor det reflekteres tilbage til det halvgennemsigtige

spejl. Den anden del af lyset sendes i en 90° vinkel i en anden retning, til et spejl hvor det reflekteres tilbage til det halvgennemsigtige spejl. Efterfølgende vil de to tilbagevendende lysstråler følges ad til et måle instrument. Skematisk ser Michelson og Morleys opstilling således ud (set figur 6.3). Denne type



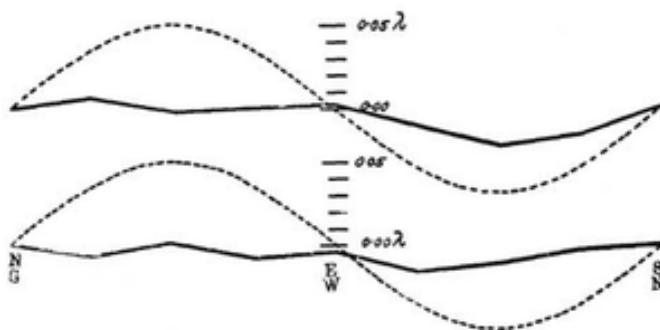
© 2010 Encyclopædia Britannica, Inc.

Figur 6.3 – Michelson-Morley eksperimentet skitseret

eksperimentel opstilling kaldes for et interferometer, da man undersøger interferensen mellem de to lys gange. Som vist på figur 6.3 kan længden af den ene lysgang varieres.

RESULTATET AF MICHELSON & MORLEYS EKSPERIMENT:

Det er klart at Michelson og Morley forventede at finde æteren og dermed påvise at lys udbredte sig i dette hypotetiske medium som var den generelle antagelse på dette tidspunkt. På figur 6.4 herunder ses de resultater som Michelson og Morley udgav. Resultaterne skal læses på således at den stiplede linje er det di burde have målt hvis der havde været en æter. Mens de fuldt optrukne linjer er det de reelt målte. Det er tydeligt at der ikke er noget belæg for at konkludere at der findes en æter. Dermed blev dette eksperiment det mest berømte *“mislykkede”* eksperiment i fysikkens historie.



Figur 6.4 – Resultaterne fra Michelson-Morley eksperimentet

Eksperimentet blev så berømt at det regnes for et af de første eksperimentelle understøttelser af den specielle relativitetsteori. Endvidere betød eksperimentet at Albert A. Michelson i 1907 blev tildelt en Nobelpris i fysik. Begrundelsen for Nobelprisen var dog ikke eksperimentet som sådan, men en mere generel begrundelse.

“For his optical precision instruments and the spectroscopic and metrological investigations carried out with their aid”.

The Nobel Foundation

ARVEN EFTER MICHELSON & MORLEY:

Der er sket meget med vores forståelse af verden siden Michelson og Morley lavede deres eksperiment, og afkræftede teorien om æteren. Men ikke desto mindre anvendes interferometeret som var kernen i deres eksperiment, stadig den dag i dag. Idag anvendes interferometeret dog mest til at lede efter gravitationsbølger som er en anden af Einsteins forudsigelser. Det store forskningscenter hedder *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*, forkortet LIGO, det ligger i Livingston Louisiana i USA, du kan læse mere om LIGO på nettet¹. Forskere har endvidere foreslået at man laver et tilsvarende instrument i rummet dette skulle hedde *Laser Interferometer Space Antenna*, forkortet LISA, dette instrument kan du også læse mere om på nettet².

¹<http://en.wikipedia.org/wiki/LIGO>

²http://en.wikipedia.org/wiki/Laser_Interferometer_Space_Antenna

Einsteins Biografi

Biografi

Life is an experiment.

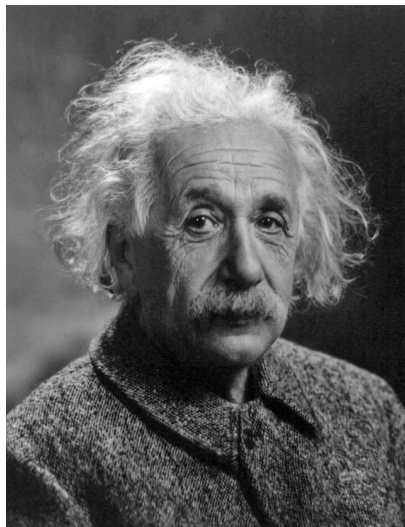
A. Einstein

Contents

7.1 Mileva & Einstein	27
7.2 Politiske holdninger	28
7.3 Einstein & atombomben	29

Albert Einstein kommer til verden i Ulm som ligger i Württemberg den 14. marts 1879. På det tidspunkt viste ingen at han senere skulle blive en verdensberømt fysiker.

Einsteins moder, Pauline Kock, var jøde. Som 18-årig giftede hun sig med Hermann Einstein, året var 1876. Hermann var købmand, de flyttede sammen til Ulm, hvor Hermann boede. Einstein blev født som parrets første barn. De følgende år blev en turbulent tid og allerede i 1880 flyttede familien til München, hvor Hermann stiftede firmaet *Elektrotechnische Fabrik J. Einstein & Cie*, med Hermanns bror som kompanion. I november måned 1881 kommer Einsteins lillesøster Maria til verden. Stik imod tidens trent var Einsteins moder en veluddannet kvinde, hvorfor hun spillede klaver, Pauline ønskede at den unge Einstein blev dannet derfor fik hun den 5-årige Einstein til at tage violintimer.



Figur 7.1 – Portrat af A. Einstein 1947

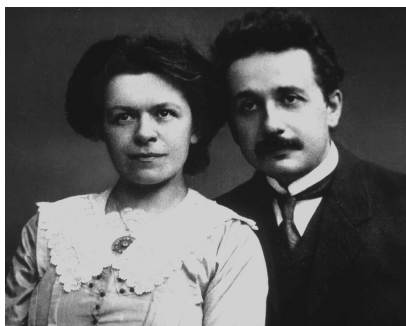
Allerede i 1894 var det slut med tiden i München. Faderens firma var gået nederom og hjem. Derfor flyttede familien nu til Milano i Italien. Dog blev den nu 15-årige Albert tilbage i München. Einsteins far Hermann havde et skidt helbred og i 1902, døde han af et hjertesvigt i oktober måned.

Derfor flyttede Einsteins moder Pauline nu til Tyskland for at bo hos sin søster. Det gjorde hun ind til hun fik kræft og døde i 1919.

På dette tidspunkt gik Einstein på det tekniske universitet *Eidgenössische polytechnische Schule* i Zürich, Schweiz. Men på universitetet klarede Einstein kun at leve op til kravene i fagene fysik og kemi. Hvor han scorede nogle særdeles høje karakterer. Mens Einstein læste mødte han den serbiske Mileva Marić. Over tid udviklede venskabet mellem Einstein og Mileva venskabs sig og i januar 1903 giftede de sig. De fik deres første barn året før nemlig i 1902. Hendes navn var *Lieserl* (oversat til Lille Lise). Vi ved ikke meget om hende, og man kendte ikke til hendes eksistens før i 1936, hvor man opdagede hende i en brevveksling mellem Einstein og Mileva. Hun blev omtalt i breve frem til 1903 hvorefter der ikke refereres yderligere til hende, man er derfor i tvivl om hvorvidt hun er død, eller blevet bortadopteret.

MLEVA OG EINSTEIN:

Der hersker ingen tvivl om at forholdet mellem Mileva og Einstein var baseret på kærlighed til både videnskaben og til hinanden. De har formentlig diskuteret deres intellektuelle ambitioner. Selvom de ikke delte de samme videnskabelige mål og at de ikke var forskningsfæller så har Einstein uden tvivl diskuteret udviklingen af sine teorier og idéer med Mileva, og hendes bidrag har ligeledes uden tvivl hjulpet Einstein på vej. Når det er sagt skal vi også bemærke at man ikke ved meget om det faglige forhold mellem Mileva og Einstein, men Milevas rolle er om end lille så enormt indflydelsesrig på Einstein.



Figur 7.2 – Albert Einstein og Mileva Marić i 1912

For Mileva var et strålende geni. Det faktum at hun som kvinde i starten af 1900-tallet har formået at få optagelse ved ETH *Eidegenössische Technische Hochschule*, mere end antyder at hun har været et geni.

Med kærlighed følger videnskab for Einstein. Einstein har efter alt at dømme ikke været i stand til at elske en person, uden også at kunne føre en intellektuel samtale med den samme person. Einstein beskriver Mileva som sin lige, hvilket betyder at han nære den dybeste personlige så-

vel som faglige respekt for hende. Den respekt for kvinder havde Einstein med fra sin moder, denne tillod ham at betragte sin kone som ligeværdig, i en tid hvor kvinder ikke havde nogen større status. Einsteins moder havde påvirket den unge Einstein i form af en stærk rollemodel med musiske og kunstneriske karaktertræk, Einstein var således ikke underlagt tiden dogme med at nedgøre eller se ned på kvinderne.

Mileva fik aldrig afsluttet sin uddannelse ved ETH, og uden en afsluttet uddannelse, kæmpede hun med at få gang i den videnskabelige karriere. Til hendes fordel skal det dog nævnes at der var en forudindtaget imod kvinder ved de højere læreranstalter, dette kan have influeret på hendes manglende afslutning på studierne. Endvidere var hun gravid i ottende måned med deres andet barn, på det tidspunkt hvor hun skulle til de afsluttende eksamener. Ligeledes kan hendes serbiske rødder have haft en indvirkning, på de manglende eksamener, og det faktum at end ikke lærerene ved ETH var fordomsfri, og med et Europa på randen af 1. verdenskrig var der rigelige nationale spændinger landende imellem. Mileva ansøgte efter at hun og Einstein var blevet gift om et undervisnings certifikat, til trods for at hun aldrig havde bestået sine

eksamener, det tyder på at hun har ladet Einsteins karriere dominere hendes fremtid herefter.

Einstein og Milevas kærlighed holder ikke og de bliver skilt, I skilsmisse papirene anføre Einstein at pengene som følger med den Nobelpris han er sikke på at han vil vinde, skal tilfalde Mileva. Einstein gør ikke nye banebrydende opdagelser efter deres skilsmisse, hvilket kunne indikere at Mileva har haft en ikke så ringe betydning for Einsteins opdagelser.

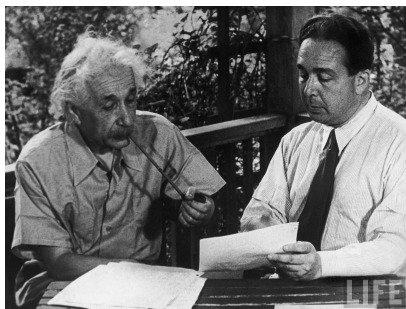
]

POLITISKE HOLDNINGER: Einstein har gennem hele sit været erklæret pacifist og indædt modstander af krig og vold. Einstein er ikke af den opfattelse at krige og vold under nogen omstændigheder kan retfærdiggøres, men Einstein mener derimod at man kan løse stridigheder gennem diplomati.

Einstein var yderst optaget af politiske og samfundsmæssige forhold, gennem hele livet. Det var på daværende tidspunkt yderst atypisk for en naturvidenskabsmand. Hertil kom at Einstein var socialist, dog uden at være en del af en gruppe eller et parti. Einstein var af jødisk afstamning, det medførte at han var nødt til at flygte fra Nazisternes udrydelse under 2. verdenskrig. Einstein flygtede til USA, og her arbejde han gennem resten af sit liv. Einstein gjorde en dyd af at holde politiske synspunkter og videnskabeligt arbejde adskilt. Til trods for Einsteins jødiske aner, var han aldrig selv praktiserende jøde.

EINSTEIN & ATOMBOMBEN:

En enkelt gang brød Einstein sit pacifistiske princip. Det drejer sig om frygten for at Hitler og Nazityskland skulle komme først med udviklingen af *atombomben*.



Figur 7.3 – Leo Szilard og Albert Einstein i 1939

at pacifismen kunne overvinde kampen mod facismen. Derfor sendte Einstein allerede i 1939 før omtalte brev.

Efter 2. verdenskrig, da Einstein sammen med resten af verden havde set de frygtelige konsekvenser af atombomben. Brugte Einstein en hel del tid på at opfordre til at nationerne specielt USSR og USA til at nedruste deres lagre af atomvåben.

Ovenstående afsnit om Einstein er baseret på [isaacson2007einstein](#) [isaacson](#) (2007).

Derfor skrev Einstein et brev til den amerikanske præsident *Roosevelt*. Brevet var foranlediget af den Ungarsk-Amerikansk fysiker Leo Szilard. Szilards navn var ikke så kendt som Einsteins og han havde derfor brug for et kendt navn til at nå igennem med sit budskab. I brevet opfordrede Einstein Roosevelt til at påbegynde udviklingen af en atombombe. Grunden til at Einstein i netop denne sag gik på kompromis med sit pacifiske ideal, var at han ikke mente

Almene & Speciel Relativitetsteori

tsteori

Life is an experiment.

A. Einstein

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis

porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

Tidsforlængelse

ængelse

Life is an experiment.

A. Einstein

Contents

9.1	Hvad er tid?	36
9.2	Kalenderen	36
9.3	Vi bestemmer tiden	37

HVAD ER TID?

Dette er et af de sværeste spørgsmål at svare på. Dertil kommer at vi alle har en forståelse af hvad tid er for noget. Det bunder i vores dagligdags opfattelse af begrebet tid.

De fleste kender begrebet at tiden kan føles lang. Altså at tiden snegler sig afsted. I de fleste menneskers optik er tiden dog uforanderlig, et sekund er et sekund uanset om det måles med et stopur, et armbåndsur, et vækkeur. Det er de færreste som er klar over hvordan tiden rent faktisk er defineret.



Figur 9.1 – Et instrument til måling af tid

I fysikkens verden regnes tiden for den fjerde dimension da denne tillader os at arrangere en række begivenheder eller observationer kronologisk i forhold til hinanden. Dette giver os som mennesker følelsen af begreberne fortid, nutid og fremtid.

KALENDEREN:

I forhistoriske tid, nogle mener så langt tilbage som for 6000 år siden har man forsøgt at holde styr på tiden. Dette har man bl.a. gjort med måne kalendre de første af disse som er beskrevet har enten 12 eller 13 måneder i en cyklus. Dette giver en længde af cyklusen på 354 eller 384 dage. Problemet med denne type kalender var den “drev” hvilket vil sige at f.eks. foråret ikke nødvendigvis lå samme sted i cyklusen hver gang og det gav problemer i forhold til at vide hvornår man skulle så sine afgrøder for at få den optimale høst. I år 45 fvt. besluttede Julius Cæsar at kalendersystemet skulle reformeres og opbyggede en ny type kalender baseret på solen. Denne blev kaldt den julianske kalender og den blev anvendt frem til år 1582. Dens store problem var det også led af en fejl som resulterede i en at kalenderen drev med 11 minutter pr. år. Derfor reformerede Pave Gregorius XIII den Julianske kalender i 1582 med hjælp fra en italiensk astronom, derfor hedder den kalender vi anvender idag den gregorianske kalender. Den gregorianske kalender er langt den mest udbredte på jorden idag.

VI BESTEMMER TIDEN:

Det var meget fint at have et kalendersystem som virkede men det gav os stadig nogle problemer i videnskaben at vi ikke præcist kunne tælle tiden. For Astronomiske observationer i det 19. og 20. århundrede afslørede at en gennemsnitlig soldag ændrede sig målbart og dermed påvirkede forudsigeligheden af årets længde. Derfor gik man bort fra at anvende sol-jord bevægelserne som basis for definitionen af sekundet som man tidligere havde gjort. i 1960'erne udviklede man atomure og dermed blev det tillokkende at anvende disse til at fastsætte længden af et sekund. Derfor har man siden 1967 defineret sekundet til at være:

“Et sekund svarer til varigheden af 9 192 631 770 perioder af strålingen som svarer til overgangen mellem de to hyperfine niveauer af grundtilstanden i et cæsium 133 atom i hvile ved temperaturen 0 K.”

Tvillingeparadokset

adokset

Life is an experiment.

A. Einstein

Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur adipisicing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur adipisicing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim.

Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consetetuer.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

Samtidig

idighed

Life is an experiment.

A. Einstein

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim.

Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consetetuer.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

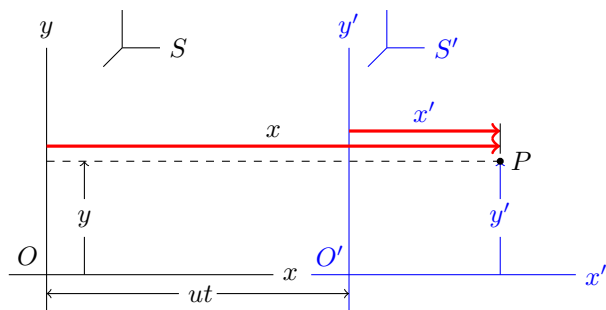
Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

Lorentz Transformationen

ationen

Life is an experiment.

A. Einstein



I kapitel 3 omtalte vi de Galileiske koordinat transformations ligninger se (G.1 - G.4) i kapitel 3. Disse transformationer relaterer koordinatet

$$(x, y, z, t) \text{ i } S \mapsto (x', y', z', t') \text{ i } S'$$

Her er en af forudsætningerne at det andet system S' bevæger sig med konstant fart u relativt til systemet S i positiv retning langs den fælles $x - x'$ akse. Denne transformation antager også at tidsskalaen er den samme i for de to systemer, hvilket fremgår af ligning (G.4) i kapitel 3. Som vi tidligere har vist gælder Galilei transformationen kun for grænseområdet for u gående mod nul. Vi er derfor nu klar til at udlede en mere generel transformation som er konsistent med relativitets princippet. Denne mere generelle transformation har fået navnet *Lorentz transformationen*. Vores første spørgsmål er følgende:

“Når en begivenhed finder sted i punktet (x, y, z) til tiden t , som det observeres i systemet S , hvad er da koordinaterne (x', y', z') og tiden t' af begivenheden som den observeres i systemet S' som bevæger sig relativt til S med konstant hastighed u og i positiv x -retning.”

For at udlede denne koordinat transformation, refererer vi igen til figuren fra kapitel 3. Som før, antager vi at de to systemers nulpunkter er sammenfaldende til tiden $t = 0 = t'$. Derfor er afstanden i S fra O til O' til tiden t stadig ut .

Koordinatet x' er en *rigtig længde* i S' , hvilket betyder at i systemet S vil den være forkortet med en faktor:

$$\frac{1}{\gamma} = \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}$$

Som vi tidligere har vist om længdeforkortning. Derfor vil afstanden x fra O til P , som den ses fra S ikke blot være $x = x' + ut$,

som vi kender fra Galilei transformationen men derimod:

$$x = ut + x' \cdot \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}} \quad (12.1) \quad \boxed{\text{eq:L1}}$$

Løser vi nu denne ligning for x' , finder vi frem til følgende:

$$x' = \frac{x - ut}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \quad (L.1) \quad \boxed{\text{eq:L2}}$$

Dette er den ene del af Lorentz transformationen. Den anden del af transformationen er den ligning som giver os t' udtrykt ved x og t . For at finde frem til denne ligning, skal vi notere os at det relativistiske princip kræver at *formen* af transformationen fra S til S' skal være identisk med transformationen fra S' til S . Den eneste forskel er at vi ændre et fortegn i forhold til den relative hastigheds komponent u . Dermed kan ligning (eq:L1) omskrives til

$$x' = -ut' + x \cdot \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}} \quad (12.2) \quad \boxed{\text{eq:L3}}$$

Vi kan nu sætte ligning (eq:L2) og (eq:L3) lig med hinanden for at eliminere x' . Dette giver os en ligning for t' udtrykt ved x og t . Dette giver:

$$t' = \frac{t - \frac{ux}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \quad (L.2) \quad \boxed{\text{eq:L4}}$$

Som vi tidligere har omtalt så er længder målt vinkelret på bevægelsesretningen ikke påvirket af bevægelsen, hvilket betyder at $y' = y$ og $z' = z$.

Samler vi nu alle udtrykkene sammen kan vi se at Lorentz transformationen består af følgende fire ligninger:

$$x' = \frac{x - ut}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} = \gamma \cdot (x - ut) \quad (L.1) \quad \boxed{\text{eq:Lx}}$$

$$y' = y \quad (L.2) \quad \boxed{\text{eq:Ly}}$$

$$z' = z \quad (L.3) \quad \boxed{\text{eq:Lz}}$$

$$t' = \frac{t - \frac{ux}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} = \gamma \cdot \left(t - \frac{ux}{c^2}\right) \quad (L.4) \quad \boxed{\text{eq:Lt}}$$

Dette sæt af ligninger er den generelle transformations beskrivelse mellem to initialsystemer i relativitetsteorien. Hvorfor vi herefter

ikke længere vil anvende Galilei transformationerne, da disse som tidligere omtalt er begrænsede til tilfældet hvor hastigheden u går mod nul.

*Dette afsnit er baseret på ^{YF2005, Adams1997}
[Young and Friedman \(2004\)](#); [Adams \(1997\)](#).*

Lorentz Transformationen & Tidsmaaling

maaling

Life is an experiment.

A. Einstein

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim.

Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consetetuer.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

Relativistisk Massefor- øgelse & Hastigheds- addition

rogelse

Life is an experiment.

A. Einstein

Vi har i kapitel ^{sec:LorentzTransformationen}12 set på hvorledes vi kunne generaliserer Galilei transformationerne, på den generelle form som lever op til det relativistiske princip kaldte vi dem for Lorentz transformationer. Vi skal nu se på hastighedstransformation som følge af Lorentz transformationen. Vi skal nu anvende ligning ^{eq:Lx}(L.1) - ^{eq:Lt}(L.4) til at udlede en relativistisk version af Galilei hastigheds transformationen, se ligning ^{eq:Gv}(G.5).

Vi betragter her udelukkende en-dimensionel bevægelse langs x-aksen og anvender begrebet “**hastighed**” som en kort form af “*x-komponenter af hastigheden*.” Antag at på tiden dt vil en partikel bevæge sig afstanden dx , som målt af observatøren i systemet S . Vi opnår samhørende værdier for afstand dx' og tid dt' i systemet S' . Ved nu at tage differentialerne af ligning ^{eq:Lx}(L.1) og ligning ^{eq:Lt}(L.4) finder vi:

$$\begin{aligned} dx' &= \gamma \cdot (dx - u dt) \\ dt' &= \gamma \cdot \left(dt - \frac{u dx}{c^2} \right) \end{aligned}$$

Divideres disse to ligninger nu med hinanden således at vi får dx'/dt' finder vi:

$$\frac{dx'}{dt'} = \frac{dx - u dt}{dt - \frac{u dx}{c^2}}$$

og deles både tæller og nævner i ovenstående resultat nu med dt finder vi følgende:

$$\frac{dx'}{dt'} = \frac{\frac{dx}{dt} - u}{1 - \frac{u}{c^2} \frac{dx}{dt}}$$

Afslutningsvis anvender vi vores viden fra Galilei hastigheds transformationen, nemlig at dx/dt er hastigheden v_x i S og at dx'/dt' er hastigheden v'_x i systemet S' . Dermed har vi vist den generelle relativistiske hastigheds transformation.

$$v'_x = \frac{v_x - u}{1 - \frac{uv_x}{c^2}} \quad (\text{L.5}) \quad \boxed{\text{eq:Lv}}$$

Når u og v_x er meget mindre end c , vil nævneren i ligning ^{eq:Lv}(L.5) gå mod 1, og vi vil gå mod et ikke relativistisk resultat hvor $v'_x = v_x - u$. Det modsatte ekstremum hvor $v_x = c$; finder vi derimod:

$$v'_x = \frac{c - u}{1 - \frac{uc}{c^2}} = \frac{c \cdot (1 - \frac{u}{c})}{1 - \frac{u}{c}} = c$$

Dette faktum betyder at hvis noget bevæger sig med hastigheden $v_x = c$ målt i systemet S vil hastigheden $v'_x = c$ også hvis den måles i S' , uanset den relative bevægelse mellem de to systemer. Dermed er ligning (L.5.1) i overensstemmelse med Einsteins postulat om at “*lysets hastighed i vakuum er den samme i alle initialsystemer*”.

Det relativistiske princip fortæller os her at der ikke er nogen fundamental forskel på de to initialsystemer S og S' . Derfor må udtrykket for v_x , udtrykt ved v'_x have samme form som ligning (L.5.1), med v_x og v'_x byttet om og ligeså med fortegnet på u . Gør man dette finder man

$$v_x = \frac{v'_x - u}{1 + \frac{uv'_x}{c^2}} \quad (\text{L.5.1}) \quad \boxed{\text{eq:Lv2}}$$

Både ligning (L.5) og ligning (L.5.1) er Lorentz hastigheds transformationer for en-dimensionel bevægelse.

Når u er mindre end c , fortæller Lorentz hastigheds transformation os at et objekt som bevæger sig med en fart mindre end c i et initialsystem, vil det samme objekt altid have en fart mindre end c i *alle andre* initialsystemer. Heraf kan vi konkludere at intet fysisk objekt kan bevæge sig med fart lig med eller større end lysets i vakuum, relativt til et *vilkårligt* initialsystem. Den relativistiske generelisering af energi og bevægelsesmængde, som vi senere skal se på vil yderligere underbygge denne konklusion.

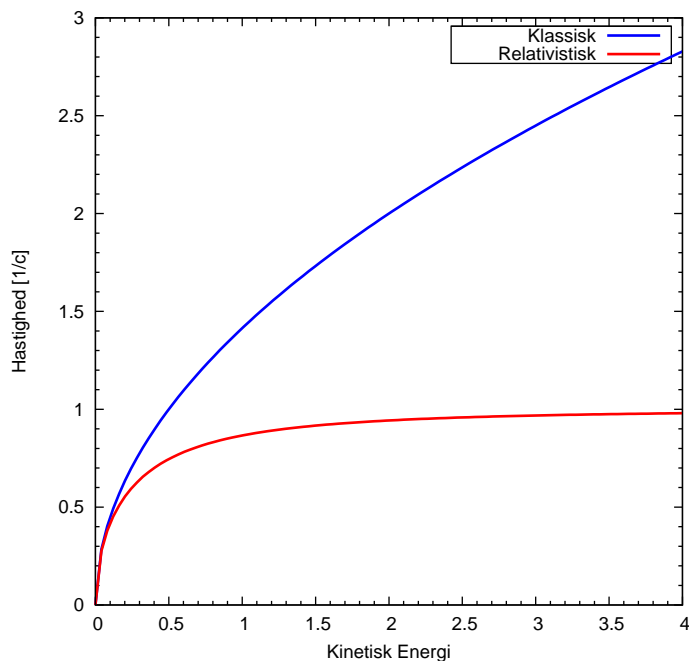
Dette afsnit er baseret på ^{YF2005, Adams1997} *Young and Friedman (2004); Adams (1997)*.

Relativistisk Mekanisk Energi

kEnergi

Life is an experiment.

A. Einstein



Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et

magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Cu-

rabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

Ækvivalensen mellem masse & energi

ec:Emcc

Life is an experiment.

A. Einstein

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim.

Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consetetuer.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

✱

✱✱✱

Litteratur

- ams1997 Adams, S.: 1997, *Relativity An introduction to space-time physics*,
Chapt. 1 - 2, pp 1 – 130, Taylor Francis
- Einstein Isaacson, W.: 2007, *Einstein: His Life and Universe*, Simon &
Schuster
- YF2005 Young, H. D. and Friedman, R. A.: 2004, *University Physics with
Modern Physics*, Chapt. 37, pp 1403 – 1444, Pearson Addison
Wesley, 11th edition

Indeks

æteren, 4, 22
æterteorien, 22

1. verdenskrig, 27
2. verdenskrig, 28, 29

Adolf Hitler, 29
Albert A. Michelson, 22–24
Albert Einstein, 6, 24, 26
atombombe, 29

bevægelse, 7
bevægelsesmængde, 57

Edward W. Morley, 22–24
Einstein, 26–29
energi, 57

Hermann Einstein, 26

initialsystem, 4, 6, 7

klassisk mekanik, 4
kraft, 4
masse, 4
sted, 4
tid, 4

koordinatsystem, 6

længdeforkortning, 48
Leo Silzard, 29
LIGO, 24
LISA, 24
love
fysiske, 6

Mileva Marić, 26–28

naturlove, 4
Nazityskland, 29
Newton, 7

1. lov, 6
Issac Newton, 6
nobelprisen, 24

observation, 7

Pauline Kock, 26
postulat, 6

relativitets princippet, 6, 48, 49, 56, 57
relativitetsteori, 6
speciel relativitetsteori, 6
relativitetsteorien, 49

Theodore Roosevelt, 29
transformation, 48

Galilei transformation, 48–50, 56
Lorentz transformation, 48, 49, 56, 57

USA, 28, 29
USSR, 29